



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS

Túlio Henrique Holtz

Análise baseada em simulação de políticas de estoque e práticas de coordenação em uma cadeia de suprimentos de placas eletrônicas

Florianópolis
2020

Túlio Henrique Holtz

Análise baseada em simulação de políticas de estoque e práticas de coordenação em uma cadeia de suprimentos de placas eletrônicas

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, com habilitação em produção.

Orientador: Prof. Enzo Morosini Frazzon, Dr.

Florianópolis
2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Holtz, Tulio

Análise baseada em simulação de políticas de estoque e práticas de coordenação em uma cadeia de suprimentos de placas eletrônicas / Tulio Holtz ; orientador, Enzo Morosini Frazzon, 2020.

186 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia de Produção Mecânica, Florianópolis,
2020.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção Mecânica. 2. Gestão da cadeia de suprimentos. 3. Simulação de eventos discretos. 4. Coordenação da cadeia de suprimentos. I. Morosini Frazzon, Enzo. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Produção Mecânica. III. Título.

Túlio Henrique Holtz

Análise baseada em simulação de políticas de estoque e práticas de coordenação em uma cadeia de suprimentos de placas eletrônicas

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenharia Mecânica com habilitação em produção e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia de Produção Mecânica.

Florianópolis, 01 de dezembro de 2020.

Prof. Guilherme Ernani Vieira, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Enzo Morosini Frazzon, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Lynceo Falavigna Braghirolli, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Silvio dos Santos Alvim, Me.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Cornelio e Vera, a quem devo inteiramente todas as conquistas e aprendizados que pude ter em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Cornelio e Vera, por seu amor e por sua base, a quem devo direta ou indiretamente por todas as conquistas e aprendizados que foram proporcionados em minha vida. Agradeço aos inúmeros amigos e amigas, muitos dos quais hoje posso chamar de irmãos e irmãs, que estiveram comigo durante esses anos intensos de universidade compartilhando momentos de estudo, trabalho e diversão. Agradeço ao professor orientador desta monografia, Enzo Morosini Frazzon, que ao abrir as portas do seu laboratório em 2015 permitiu que eu pudesse trilhar meus primeiros passos como um profissional de supply chain e logística, caminho que sigo trilhando.

*“Conheça todas as teorias.
Domine todas as técnicas.
Mas ao tocar uma alma humana,
seja apenas uma outra alma humana.
(Carl Jung)*

RESUMO

Como parte das operações de fabricação de equipamentos eletrônicos, o planejamento coordenado da cadeia de suprimentos de placas eletrônicas é imperativo. Sem um planejamento coeso, a escassez de componentes pode causar paradas de linha e aumentar substancialmente os custos da cadeia. Saber quanto pedir e com que frequência pedir são dois dos principais desafios que cada membro da cadeia de suprimentos enfrenta na gestão de suas operações, mas não os únicos. Ainda que a clássica teoria de estoques multiestágio vise responder a esses desafios através de métodos analíticos, a gestão da cadeia de suprimentos incorpora esses problemas e muito mais. É necessário, portanto, levar em conta aspectos de coordenação em que o desempenho da cadeia seja melhorado ao alinhar planos e objetivos de firmas individuais. Através da simulação de eventos discretos, 18 cenários de uma cadeia de suprimentos real, consistida de um fabricante original de equipamentos, uma montadora de placas de circuito impresso e um fornecedor, são analisados. Nestes cenários, a cadeia enfrenta uma demanda estocástica e os resultados em termos de nível de serviço e custos são obtidos com a simulação de aspectos referentes às políticas de estoque para cada membro, à mecanismos de coordenação e à alinhamentos de incentivo. Os resultados demonstram que os custos gerais da cadeia podem variar substancialmente a depender das políticas de estoque escolhidas por cada membro. Outras conclusões do estudo demonstram que o efeito chicote pode ser fortemente acentuado quando as firmas não levam em conta a demanda do cliente final em suas previsões e que levar em conta os estoques à jusante na determinação da posição de estoque das etapas mais à montante pode reduzir substancialmente os custos com manutenção dos estoques. O estudo também nos permite concluir que contratos de comprometimento mínimo entre a montadora e a fabricante podem ajudar no alinhamento de incentivos ao passo que o ônus da cadeia passa a ser melhor compartilhado, sem qualquer prejuízo ao desempenho geral da cadeia. Os resultados obtidos podem ajudar na tomada de decisão pelos gerentes das firmas envolvidas, ao mesmo tempo que propõe uma abordagem prescritiva para problemas de gestão da cadeia de suprimentos.

Palavras-chave: Gestão da cadeia de suprimentos. Controle de estoques. Coordenação da cadeia de suprimentos. Simulação de eventos discretos.

ABSTRACT

As part of electronic equipment manufacturing operations, coordinated printed circuit board assembly (PCBA) supply chain planning is imperative. Without cohesive planning, the scarcity of electronic components can cause line stops and substantially increase chain costs. Knowing how much to order and how often to order are two of the main challenges that each member of the supply chain faces in managing their operations, but not the only ones. Although the classic multiechelon inventory theory aims to respond to these challenges through analytical methods, supply chain management incorporates these problems and more. We therefore need to take into account aspects of coordination where the performance of the chain is improved by aligning individual firm plans and objectives. Through the simulation of discrete events, 18 scenarios from a real supply chain, consisting of an original equipment manufacturer (OEM), a printed circuit board manufacturer (EMS provider) and a supplier, are analyzed. In these scenarios, the supply chain faces stochastic demand and the results in terms of service level and costs are obtained by simulating aspects related to the stock policies for each member, the coordination mechanisms and the incentive alignments. The results demonstrate that the overall costs of the supply chain can vary substantially depending on the inventory policies chosen by each member. Other conclusions of the study demonstrate that the bullwhip effect can be strongly accentuated when firms do not take into account the demand of the final customer in their forecasts and that taking into account the downstream stocks in determining the stock position of the steps upstream can reduce substantially the costs of maintaining inventories. The study also allows us to conclude that minimum commitment contracts between the EMS provider and the OEM can help align incentives while the chain's burden is better shared, without any prejudice to the chain's overall performance. The results obtained can improve decision making of the firms involved, while proposing a prescriptive approach to supply chain management problems.

Keywords: Supply chain management. Inventory control. Supply chain coordination. Discrete-event simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo de Negócios	24
Figura 2 – Estoque Sazonal	32
Figura 3 – Diagrama do Nível de Estoque em Função do Tempo para o modelo EOQ	42
Figura 4 – Custo total por unidade de tempo com descontos	45
Figura 5 – Custo total por unidade de tempo com descontos	46
Figura 6 – Sistema (R, Q)	56
Figura 7 – Sistema (s, S)	57
Figura 8 – Sistema (R, S)	58
Figura 9 – Sistema em Série de Dois Níveis	60
Figura 10 – Nível de Estoque na Instalação 1	62
Figura 11 – Nível de Estoque na Instalação 2	62
Figura 12 – Demanda diária simulada do consumidor (linha sólida) e demanda diária do fornecedor (círculos). A demanda do fornecedor é igual à soma dos pedidos dos varejistas	68
Figura 13 – Demanda diária simulada do consumidor (linha sólida) e demanda do fornecedor (círculos) quando os varejistas fazem pedidos semanais. Nove varejistas fazem pedidos na segunda-feira, cinco na terça, um na quarta, dois na quinta e três na sexta	69
Figura 14 – Demanda diária simulada do consumidor (linha sólida) e demanda do fornecedor (círculos) quando os varejistas fazem pedidos em lotes de 15 unidades	70
Figura 15 – Comportamento dos Estoques sob 2 estratégias de compras diferentes	71
Figura 16 – Cadeia de Suprimentos	77
Figura 17 – Metodologia	89
Figura 18 – Cadeia de Suprimentos Real	92
Figura 19 – Cadeia de Suprimentos Simulada	93
Figura 20 – Ponto de Desacoplamento	94
Figura 21 – Modelo Conceitual da Cadeia de Suprimentos	95
Figura 22 – Distribuição dos lead times de entrega nos 6 primeiros cenários . .	113
Figura 23 – Custos Totais de Manutenção dos Estoques em Função de $R_{componentes}$	115
Figura 24 – Custos Totais com Pedidos em Função de $R_{componentes}$	116
Figura 25 – Custos da Cadeia em Função de $R_{componentes}$	116
Figura 26 – Estoque de Componentes no Cenário 1	117
Figura 27 – Estoque de Componentes no Cenário 2	117
Figura 28 – Estoque de Componentes no Cenário 3	118
Figura 29 – Estoque de Componentes no Cenário 4	118

Figura 30 – Estoque de Componentes no Cenário 5	119
Figura 31 – Estoque de Componentes no Cenário 6	119
Figura 32 – Estoque de Componentes em Importação/Transporte no Cenário 1 .	120
Figura 33 – Estoque de Componentes em Importação/Transporte no Cenário 2 .	120
Figura 34 – Estoque de Componentes em Importação/Transporte no Cenário 3 .	121
Figura 35 – Estoque de Componentes em Importação/Transporte no Cenário 4 .	121
Figura 36 – Estoque de Componentes em Importação/Transporte no Cenário 5 .	122
Figura 37 – Estoque de Componentes em Importação/Transporte no Cenário 6 .	122
Figura 38 – Estoque de Placas na Montadora - Cenários 1, 2, 3, 4, 5 e 6	123
Figura 39 – WIP na Montadora - Cenários 1, 2, 3, 4, 5 e 6	124
Figura 40 – Estoque de Placas na Fabricante - Cenários 1, 2, 3, 4, 5 e 6	124
Figura 41 – Estoque + WIP Total da Cadeia - Cenário 1	125
Figura 42 – Estoque + WIP Total da Cadeia - Cenário 2	126
Figura 43 – Estoque + WIP Total da Cadeia - Cenário 3	126
Figura 44 – Estoque + WIP Total da Cadeia - Cenário 4	127
Figura 45 – Estoque + WIP Total da Cadeia - Cenário 5	127
Figura 46 – Estoque + WIP Total da Cadeia - Cenário 6	128
Figura 47 – Efeito Chicote - Cenário 1	129
Figura 48 – Efeito Chicote - Cenário 2	129
Figura 49 – Efeito Chicote - Cenário 3	130
Figura 50 – Efeito Chicote - Cenário 4	130
Figura 51 – Efeito Chicote - Cenário 5	131
Figura 52 – Efeito Chicote - Cenário 6	131
Figura 53 – Distribuição dos lead times de entrega nos cenários 7, 8, 9 e 10 . .	133
Figura 54 – Custos da Cadeia em Função de $R_{placas,montadora}$	134
Figura 55 – Custos Totais com Man. dos Estoques em Função de $R_{placas,montadora}$	135
Figura 56 – Custos Totais com Pedidos em Função de $R_{placas,montadora}$	135
Figura 57 – Custos com Man. de Estoques na Montadora em Função de $R_{placas,montadora}$	136
Figura 58 – Estoque de Componentes - Cenário 7	137
Figura 59 – Estoque de Componentes - Cenário 8	138
Figura 60 – Estoque de Componentes - Cenário 9	138
Figura 61 – Estoque de Componentes - Cenário 10	139
Figura 62 – Estoque de Placas na Montadora - Cenário 7	139
Figura 63 – Estoque de Placas na Montadora - Cenário 8	140
Figura 64 – Estoque de Placas na Montadora - Cenário 9	140
Figura 65 – Estoque de Placas na Montadora - Cenário 10	141
Figura 66 – Custos com Pedido na Montadora em Função de $R_{placas,montadora}$. .	141
Figura 67 – Efeito Chicote - Cenário 7	143

Figura 68 – Efeito Chicote - Cenário 8	144
Figura 69 – Efeito Chicote - Cenário 9	144
Figura 70 – Efeito Chicote - Cenário 10	145
Figura 71 – Custos da Cadeia em Função de $R_{placas,fabricante}$	147
Figura 72 – Estoque de Placas na Fabricante - Cenário 11	148
Figura 73 – Estoque de Placas na Fabricante - Cenário 12	148
Figura 74 – Estoque de Placas na Fabricante - Cenário 13	149
Figura 75 – Estoque de Placas na Fabricante - Cenário 14	149
Figura 76 – Custos Totais com Man. dos Estoques em Função de $R_{placas,fabricante}$	150
Figura 77 – Estoque de Componentes - Cenário 11	151
Figura 78 – Estoque de Componentes - Cenário 12	151
Figura 79 – Estoque de Componentes - Cenário 13	152
Figura 80 – Estoque de Componentes - Cenário 14	152
Figura 81 – Estoque de Placas na Montadora - Cenário 11	153
Figura 82 – Estoque de Placas na Montadora - Cenário 12	153
Figura 83 – Estoque de Placas na Montadora - Cenário 13	154
Figura 84 – Estoque de Placas na Montadora - Cenário 14	154
Figura 85 – WIP na Montadora - Cenário 14	155
Figura 86 – Custos Totais com Pedidos em Função de $R_{placas,fabricante}$	156
Figura 87 – Custos Totais com Pedidos da Fabricante em Função de $R_{placas,fabricante}$	157
Figura 88 – Efeito Chicote - Cenário 11	158
Figura 89 – Efeito Chicote - Cenário 12	158
Figura 90 – Efeito Chicote - Cenário 13	159
Figura 91 – Efeito Chicote - Cenário 14	159
Figura 92 – Estoque + WIP total da Cadeia - Cenário 11	160
Figura 93 – Estoque + WIP total da Cadeia - Cenário 12	161
Figura 94 – Estoque + WIP total da Cadeia - Cenário 13	161
Figura 95 – Estoque + WIP total da Cadeia - Cenário 14	162
Figura 96 – Distribuição dos lead times de entrega no cenário 15	164
Figura 97 – Efeito Chicote - Cenário 15	165
Figura 98 – Estoque de Componentes - Cenário 15	166
Figura 99 – Estoque de Placas na Montadora - Cenário 15	166
Figura 100–Estoque de Placas na Fabricante - Cenário 15	167
Figura 101–Comparativo nos Custos da Cadeia - Cenário 7 vs 16	168
Figura 102–Custos Manutenção de Estoques - Cenário 7 vs. Cenário 16	168
Figura 103–Estoque de Componentes - Cenário 7	169
Figura 104–Estoque de Componentes - Cenário 16	170
Figura 105–Estoque de Placas na Montadora - Cenário 7	170
Figura 106–Estoque de Placas na Montadora - Cenário 16	171

Figura 107–Distribuição dos lead times de entrega no cenário 16	172
Figura 108–Efeito Chicote - Cenário 16	173
Figura 109–Efeito Chicote - Cenário 17	174
Figura 110–Custos Manutenção de Estoques - Cenário 16 vs. Cenário 17	175
Figura 111–Custos Totais com Pedido - Cenário 16 vs. Cenário 17	175
Figura 112–Estoque de Placas na Montadora - Cenário 18	177
Figura 113–Efeito Chicote - Cenário 18	178

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados e Funções de Entrada do Modelo	97
Tabela 2 – Cenário 1	101
Tabela 3 – Cenário 2	101
Tabela 4 – Cenário 3	102
Tabela 5 – Cenário 4	102
Tabela 6 – Cenário 5	103
Tabela 7 – Cenário 6	103
Tabela 8 – Cenário 7	104
Tabela 9 – Cenário 8	104
Tabela 10 – Cenário 9	105
Tabela 11 – Cenário 10	105
Tabela 12 – Cenário 11	106
Tabela 13 – Cenário 12	106
Tabela 14 – Cenário 13	107
Tabela 15 – Cenário 14	107
Tabela 16 – Cenário 15	108
Tabela 17 – Cenário 16	108
Tabela 18 – Cenário 17	109
Tabela 19 – Cenário 18	110
Tabela 20 – Dados de Saída de Abastecimento	111
Tabela 21 – Custos com Pedido na Montadora	111
Tabela 22 – Custos com Pedido na Fabricante	111
Tabela 23 – Custos com Manutenção de Estoques	112
Tabela 24 – Custos da Cadeia	112
Tabela 25 – Métricas de Pedido e Efeito Chicote	112
Tabela 26 – Métricas de Abastecimento - 6 Primeiros Cenários	114
Tabela 27 – Métricas de Pedidos e Efeito Chicote - Primeiros 6 Cenários	132
Tabela 28 – Custos Totais da Cadeia - Primeiros 6 Cenários	132
Tabela 29 – Métricas de Abastecimento - Cenários 7, 8, 9 e 10	133
Tabela 30 – Métricas de Pedido e Efeito Chicote - Cenários 7, 8, 9 e 10	145
Tabela 31 – Custos Totais da Cadeia - Cenários 7, 8, 9 e 10	146
Tabela 32 – Métricas de Abastecimento - Cenários 11, 12, 13 e 14	146
Tabela 33 – Métricas de Pedidos e Efeito Chicote - Cenários 11, 12, 13 e 14	157
Tabela 34 – Custos Totais da Cadeias - Cenários 11, 12, 13 e 14	162
Tabela 35 – Métricas de Abastecimento - Cenário 15	163
Tabela 36 – Métricas de Abastecimento - Cenário 16	171
Tabela 37 – Métricas de Pedido e Efeito Chicote - Cenário 16	172

Tabela 38 – Custos Totais da Cadeia - Cenários 7 e 16	173
Tabela 39 – Métricas de Abastecimento - Cenário 18	176

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	PROBLEMÁTICA	19
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivo Geral	19
1.2.2	Objetivos Específicos	19
1.3	JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA	19
2	REVISÃO DE LITERATURA	23
2.1	CONTROLE DE ESTOQUES	23
2.1.1	Contextualização e importância	23
2.1.2	Giro de Estoque e Custos de Estoque	25
2.1.2.1	Custo Variável Unitário, c	27
2.1.2.2	Custos de Manutenção dos Estoques, h	27
2.1.2.3	Custos de Pedido ou Custos de Setup, K	28
2.1.3	Razões para a existência dos estoques	30
2.1.4	Teoria de Estoques e Sistemas de Reposição	35
2.1.4.1	Principais componentes e classificação dos modelos de estoque	37
2.1.4.2	Modelos de estoques para sistemas de único nível com demanda determinística e constante	40
2.1.4.2.1	<i>EOQ - Economic Order Quantity</i>	40
2.1.4.2.2	<i>EOQ com descontos de quantidades</i>	44
2.1.4.2.3	<i>EOQ com atrasos</i>	45
2.1.4.2.4	<i>Taxa de reposição finita: EPQ</i>	48
2.1.4.3	Modelos de estoque para sistemas de único nível com demanda determinística e variável no tempo	49
2.1.4.4	Modelos de estoque para sistemas de único nível com demanda estocástica	51
2.1.4.5	Modelos de dimensionamento de lotes para sistemas multi-nível/multi-escala	59
2.2	GESTÃO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS	64
2.2.1	Efeito Chicote e Mecanismos de Coordenação	66
2.2.2	Conflito de interesses e Contratos de Fornecimento	77
2.2.3	A gestão da cadeia de suprimentos e a pesquisa operacional	81
3	METODOLOGIA	84
3.1	PRINCIPAIS VANTAGENS DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO	84
3.2	PRINCIPAIS CONCEITOS NA SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS	85
3.3	PASSOS PARA O ESTUDO DE SIMULAÇÃO	86

4	APLICAÇÃO A UM CASO PRÁTICO	90
4.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS	90
4.2	CONCEITUALIZAÇÃO DO MODELO	91
4.3	COLETA DE DADOS	96
4.4	TRADUÇÃO, VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO	96
4.5	CRIAÇÃO DOS CENÁRIOS	99
4.5.1	Cenário 1	100
4.5.2	Cenário 2	101
4.5.3	Cenário 3	101
4.5.4	Cenário 4	102
4.5.5	Cenário 5	102
4.5.6	Cenário 6	103
4.5.7	Cenário 7	103
4.5.8	Cenário 8	104
4.5.9	Cenário 9	104
4.5.10	Cenário 10	105
4.5.11	Cenário 11	105
4.5.12	Cenário 12	106
4.5.13	Cenário 13	106
4.5.14	Cenário 14	107
4.5.15	Cenário 15	107
4.5.16	Cenário 16	108
4.5.17	Cenário 17	109
4.5.18	Cenário 18	109
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	111
5.1	ANÁLISE COMPARATIVA DOS CENÁRIO 1, 2, 3, 4, 5 E 6	113
5.2	ANÁLISE COMPARATIVA DOS CENÁRIOS 7, 8, 9 E 10	132
5.3	ANÁLISE COMPARATIVA DOS CENÁRIOS 11, 12, 13 E 14	146
5.4	ANÁLISE DO CENÁRIO 15	163
5.5	ANÁLISE COMPARATIVA DO CENÁRIO 7 E DO CENÁRIO 16	167
5.6	ANÁLISE COMPARATIVA DO CENÁRIO 16 DO CENÁRIO 17	173
5.7	ANÁLISE DO CENÁRIO 18	176
6	CONCLUSÃO	179
	REFERÊNCIAS	183

1 INTRODUÇÃO

Uma das mudanças de paradigma mais significativas da gestão empresarial moderna é que empresas individuais não competem mais como entidades apenas autônomas, mas como cadeias de suprimentos (LAMBERT; STOCK; ELLRAM, 1998). As cadeias de suprimento, por sua vez, podem ser definidas como um sistema de organizações, pessoas, atividades, informações e recursos envolvidos na movimentação de um produto ou serviço do fornecedor para o cliente. As atividades da cadeia de suprimentos envolvem a transformação de recursos naturais, matérias-primas e componentes em um produto acabado que é entregue ao cliente final. La Londe e Masters (1994) propõem que uma cadeia de suprimentos consiste em um conjunto de empresas que fluem materiais. Para esses autores, várias empresas independentes estão envolvidas na fabricação de um produto, levando às mãos do usuário final em uma cadeia de suprimentos: produtores de matérias-primas e componentes, montadores de produtos, atacadistas, comerciantes varejistas e empresas de transporte são todos membros de uma cadeia.

Muito embora o conceito de cadeia de suprimentos varie muito pouco entre autores, o conceito de gestão da cadeia de suprimentos (GCS), por sua vez, acaba por ser menos consensual. Mentzer *et al.* (2001) argumentam que as diversas definições de gestão de cadeia de suprimentos podem ser classificadas em três categorias: 1) uma filosofia de gestão, isto é, uma abordagem sistêmica que trata a cadeia como uma única entidade; 2) a implementação de uma filosofia de gestão, onde firmas devem estabelecer práticas de gestão que as permitam agir e se comportar consistentemente com a filosofia e 3) um conjunto de processos de gestão, onde todas as funções dentro da cadeia devem ser reorganizadas como processos chave cujo foco deve estar em atender as necessidades dos clientes, de forma em que todas as firmas estejam organizadas em torno desses processos. Lambert, Stock e Ellram (1998) sugerem que processos chave típicos incluem: gestão do relacionamento do cliente, gestão do serviço ao cliente, gestão da demanda, atendimento de pedidos, gestão do fluxo de fabricação, provisionamento e desenvolvimento e comercialização de produtos. Por fim, Mentzer *et al.* (2001) acabam por definir a gestão de cadeia de suprimentos como “a coordenação estratégica e sistêmica das funções de negócios tradicionais e as táticas entre essas funções de negócios em uma empresa específica e entre empresas da cadeia de suprimentos, com o objetivo de melhorar o desempenho a longo prazo de cada empresa e o cadeia de suprimentos como um todo.”

Ainda que a nomenclatura “gestão da cadeia de suprimentos” seja relativamente nova, muitos de seus problemas não o são. Em particular, os modelos matemáticos para otimizar o controle de estoques têm uma longa história como parte significativa da literatura da pesquisa operacional e da gestão de operações. A modelagem de

estoques, por si só, data do início do século e das ideias de um engenheiro da Westinghouse chamado Ford Harris em 1913 (TSAY; NAHMIA; AGRAWAL, 1999). Uma questão natural a ser abordada primeiramente é o que se entende pela área de pesquisa em gestão da cadeia de suprimentos e como ela se relaciona com o vasto corpo de trabalho que constitui a teoria clássica da gestão de estoques. Uma maneira de interpretar isso é a de que a pesquisa sobre GCS é essencialmente a mesma que a teoria de estoques multiestágio, introduzida por Clark e Scarf (2004) para modelar problemas de logística encontrados pelos militares. Tsay, Nahmias e Agrawal (1999) argumentam que, mesmo que a estrutura básica dos sistemas estudados sejam similares, a pesquisa em GCS incorpora um escopo muito maior do que simplesmente a teoria de estoques multiestágio; isto é, enquanto a teoria de estoques multiestágio trata basicamente do controle do tempo e quantidade dos fluxos de materiais, a gestão da cadeia de suprimentos estuda isso e mais. A GCS acaba por tratar de ambientes onde existem múltiplos tomadores de decisão, que podem ser diferentes empresas ou diferentes divisões de uma mesma empresa. Comportamentos que podem ser racionais localmente podem ser ineficientes se olhados sob uma perspectiva global, logo se faz necessário adotar métodos para melhorar a eficiência do sistema sob essa perspectiva (WHANG, 1995). Dada a estrutura dinâmica em evolução contínua das cadeias de suprimentos, muitos desafios interessantes emergem para uma coordenação eficaz do sistema. Os membros da cadeia não podem competir como membros independentes, dado que o produto usado pelo cliente final passa por várias entidades que contribuíram na agregação de valor do produto antes do consumo. Para melhorar o desempenho geral da cadeia, seus membros podem se comportar como parte de um sistema unificado e coordenar-se entre si (ARSHINDER; KANDA; DESHMUKH, 2008). Assim, a 'coordenação' entra em foco.

A coordenação é um critério importante usado para medir o desempenho da cadeia de suprimentos. Dizemos que uma cadeia, rede ou canal (cada termo é mais comumente utilizado em uma literatura específica) são coordenados quando um único tomador de decisão otimiza a rede com a união de informações que os vários tomadores de decisão possuem. A falta de coordenação ocorre justamente devido à existência de vários tomadores de decisão na rede que podem ter informações e incentivos diferentes. A coordenação da cadeia de suprimentos com contratos é geralmente usada para remover a ineficiência ao longo da cadeia e alinhar os objetivos de seus membros (CACHON, 2003). Em uma cadeia típica de dois estágios, o comprador e o fornecedor concordam com preços, descontos, quantidades de compra, prazos de entrega, qualidade do produto e políticas de devolução por meio de um contrato (SIMCHI-LEVI; KAMINSKY; SIMCHI-LEVI, 1999). Podemos compreender, assim, que a gestão da cadeia de suprimentos constituída de múltiplos agentes que possuem objetivos por muitas vezes conflitantes requer uma nova consideração sobre o relacionamento entre

as partes. Pesquisas recentes vêm explorando arranjos que não são considerados na teoria de estoques mais tradicional; esses arranjos podem ser assim chamados de contratos. O estudo foi realizado no contexto de uma multinacional fabricante original de equipamentos (FOE). Esses equipamentos eletrônicos são utilizados na automação, proteção e controle de subestações de transmissão de energia elétrica.

1.1 PROBLEMÁTICA

Pode-se abordar a problemática endereçada neste trabalho através da seguinte pergunta: quais políticas de estoque e quais mecanismos para uma maior coordenação de uma cadeia de suprimentos complexa e que enfrenta altos lead times devem ser adotados e quais devem ser evitados?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral dessa monografia consiste em avaliar diferentes políticas de estoque bem como práticas de coordenação e resolução de conflitos de interesses em uma cadeia de suprimentos constituída por um fornecedor, uma montadora de placas e uma fabricante original de equipamentos.

1.2.2 Objetivos Específicos

Visando alcançar o objetivo geral deste trabalho, foram definidos os objetivos específicos a seguir:

- Propor uma abordagem baseada em simulação para analisar políticas de estoque em uma cadeia de suprimentos constituída por um fornecedor, uma montadora de placas e uma fabricante original de equipamentos;
- Avaliar quais mecanismos de coordenação podem ser necessários para melhorar o desempenho da cadeia e mensurar o tamanho deste impacto;
- Avaliar se um contrato de comprometimento mínimo pode ajudar a cadeia a gerenciar os conflitos de interesse;
- Avaliar práticas que podem ser prejudiciais para a coordenação da cadeia de suprimentos e como elas devem ser evitadas;

1.3 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA

O trabalho se justifica tanto por sua relevância e contribuição prática quanto teórica. Conforme argumentam Ballou, Gilbert e Mukherjee (2000), a coordenação é uma alavanca central da GCS. Primeiramente, a importância de se estudar a coordenação de cadeia de suprimentos se dá por conta de sua complexidade, caracterizada por

inúmeras atividades e operações que se encontram espalhadas por várias funções e organizações em diferentes países do mundo. De um modo geral, parece haver uma falta geral de capacidade gerencial para integrar e coordenar a intrincada rede de relações comerciais entre os membros de uma cadeia de suprimentos (CHEN; ZHANG; SUN, 2012). Stank, Crum e Arango (1999) estudaram processos de coordenação entre empresas caracterizados por comunicação eficaz, troca de informações, parceria e monitoramento de desempenho. Lee, Padmanabhan e Whang (2004) propõe a coordenação da CS como um veículo para redesenhar direitos de decisão, fluxo de trabalho e recursos entre os membros da cadeia para alavancar um melhor desempenho, como margens de lucro mais altas, desempenho aprimorado do serviço ao cliente e tempo de resposta mais rápido.

Conforme lembra Tsay (2013), é da terceirização que emergem os maiores desafios de coordenação e alinhamentos de incentivo dentro da cadeia de suprimentos, e por isso é um tema natural para a agenda de pesquisa da gestão de operações, que se concentra em: (i) vincular as operações ao ambiente externo e à estratégia da empresa; (ii) melhorar as operações dentro da organização interna e (iii) gerenciar efetivamente as atividades realizadas por vendedores ou fornecedores. Enquanto isso, as decisões de terceirização: (i) são indissociáveis da estratégia da empresa e das características do ambiente externo; (ii) ditam a escala e o escopo da organização (incluindo sua distribuição geográfica); e (iii) determinam quais atividades serão executadas por vendedores ou fornecedores, que devem ser gerenciadas. Inúmeros estudiosos da gestão de operações dedicaram considerável atenção ao entendimento dos desafios que a terceirização apresenta para o desenvolvimento de capacidade interna, coordenação e alinhamento de incentivos. Assim sendo, a potencial contribuição para analistas, gerentes e quaisquer outros praticantes dentro do mundo de suprimentos no contexto da cadeia de eletrônicos é um dos principais elementos que motivaram o desenvolvimento desta monografia.

O enfoque se dá na cadeia de eletrônicos por conta de algumas características intrínsecas dessa cadeia. Primeiramente, a indústria eletrônica é altamente centrada no cliente, cujas empresas devem lidar com as altas variabilidades da demanda e da oferta. Os consumidores tendem a se inclinar para um produto que os atrai com os recursos de que precisam, quando precisam. O crescimento da tecnologia alimenta diretamente a demanda por componentes eletrônicos para acompanhar a progressão dos produtos eletrônicos. Ao mesmo tempo que esse tipo de crescimento traz uma perspectiva interessante para fabricantes originais de equipamento (FOE), traz desafios para a cadeia de suprimentos, resultando em escassezes que podem ter longas durações. Atualmente, os prazos de resistores e capacitores duram de 18 a 50 semanas. A frase marcante do então presidente da Intel em 1986, Andrew Grove, enfatiza bem a realidade da cadeia de componentes eletrônicos: “combinar a capacidade de

produção com a demanda é um problema amplo do setor. Vamos acompanhar a demanda na próxima recessão. Haverá um equilíbrio exato de oferta e demanda por 35 minutos.” Principalmente para grandes empresas internacionais, tal como a em questão, a complexidade da coordenação das cadeias de suprimentos aumenta cada vez mais. Primeiramente, os ciclos de vida cada vez menores do produto, somados aos longos prazos de entrega, desafiam as operações e as cadeias de eletrônicos de alto volume. Segundo, comumente as empresas que operam em escala global acabam por terceirizar as atividades de fabricação e montagem, fragmentando a cadeia de suprimentos em empresas independentes do ponto de vista operacional e legal. Nesse sentido, a nova batalha competitiva não é mais entre empresas individuais, mas entre cadeias de suprimentos de várias empresas.

Neste capítulo deste trabalho, foram introduzidos a problemática e objetivos geral e específico, bem como a relevância acadêmica e prática do tema.

No segundo capítulo, é apresentada uma profunda revisão de literatura sobre a gestão de estoques e como a teoria clássica de estoques evoluiu ao longo das décadas. Quando problemas de estoque passam a ter um enfoque inter-firmas, problemas de coordenação e alinhamento de incentivos emergem, e é justamente aí que entra em foco o promissor campo conhecido como gestão da cadeia de suprimentos. Quanto mais as premissas mais simplificadas dos modelos analíticos prescritivos de estoque são relaxadas, mais complicados eles se tornam de ser resolvidos e menos significado para a tomada de decisão gerencial eles passam a ter. Justifica-se, portanto, a escolha de uma modelagem prescritiva para a metodologia do trabalho.

No terceiro capítulo é proposta uma variação da metodologia de Banks (1998) para a execução de estudos de simulação de eventos discretos. Primeiramente define-se o problema e os objetivos, e logo após a conceitualização do modelo e coleta de dados, realiza-se a tradução do modelo para um simulador computacional. A tradução é feita ao passo que o modelo é verificado (construído corretamente) e validado (o modelo correto e mais representativo para o estudo é construído). Com o modelo verificado e validado, cenários que permitam com que à problemática seja endereçada e os objetivos do estudo sejam alcançados são contruídos e simulados, com posterior discussão dos resultados e documentação.

No quarto capítulo a metodologia apresentada no terceiro capítulo é aplicada a um caso prático de uma cadeia de suprimentos consistida por um fornecedor, uma montadora de placas de circuito impresso e uma fabricante original de equipamentos. Essa cadeia de suprimentos enfrenta altos *lead times* entre o fornecedor e a montadora de placas ao passo que o cliente final exige *lead times* menores ou iguais à duas semanas. Dessa forma, 18 cenários são simulados visando encontrar políticas de estoque e outros mecanismos que permitam a cadeia operar de maneira mais coordenada.

No quinto capítulo os resultados da simulação são apresentados e uma discus-

são sobre os resultados é realizada. Por fim, as principais conclusões da presente monografia se dão no sexto capítulo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONTROLE DE ESTOQUES

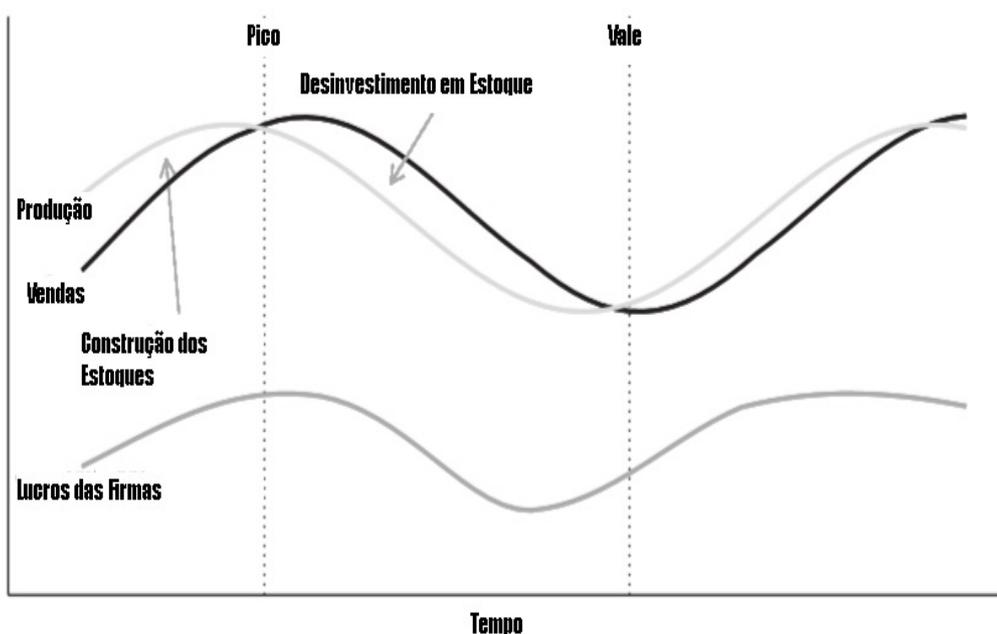
2.1.1 Contextualização e importância

Os avanços dramáticos nas tecnologias da informação e comunicação permitiram que as empresas estivessem mais estreitamente conectadas a uma rede ampla e global de fornecedores que fornecem componentes, produtos acabados e serviços. Os clientes desejam seus produtos com rapidez e confiabilidade, mesmo que sejam provenientes de outro continente; e geralmente estão dispostos a procurar outros fornecedores se os produtos forem entregues frequentemente com atraso. Como resultado, o gerenciamento de estoque e o planejamento e programação da produção se tornaram ainda mais vitais para o sucesso competitivo (SILVER; PYKE; PETERSON, 2016). De fato, os estoques permeiam o mundo dos negócios. A manutenção de estoques é necessária para qualquer empresa que lide com produtos físicos, incluindo fabricantes, atacadistas e varejistas. Por exemplo, os fabricantes precisam de estoques dos materiais necessários para fabricar seus produtos. Eles também precisam de estoques de produtos acabados que estão prontos para serem despachados. Da mesma forma, tanto os atacadistas como os varejistas precisam manter estoques de mercadorias para estarem disponíveis para compra pelos clientes. O campo do controle de estoques, que outrora costumava significar a aplicação de regras simples de decisão que costumavam ser realizadas manualmente, mudou drasticamente nas últimas décadas (SILVER; PYKE; PETERSON, 2016). Os avanços na tecnologia da informação somado ao recente progresso na pesquisa mudaram as possibilidades de aplicar técnicas extremamente eficientes de controle de estoque, resultando em métodos novos e mais gerais que podem reduzir substancialmente os custos da cadeia de suprimentos. A importância estratégica dos estoques é hoje totalmente reconhecida pela alta gerência. O investimento total em estoques é enorme, e o controle do capital vinculado a matéria-prima, material em processo e produtos acabados oferece um potencial muito importante de melhoria (AXSATER, 2006).

Conforme argumentam Silver, Pyke e Peterson (2016), sob um ponto de vista macro, o investimento agregado em estoques está intimamente ligado com os ciclos de negócios onde períodos de expansão (com baixas taxas de desemprego e um otimismo geral dos agentes econômicos) são seguidos por períodos de recessão (com altas taxas de desemprego e um pessimismo geral dos agentes econômicos). Mesmo que cada ciclo econômico varie bastante quanto à sua duração e magnitude, suas características tendem a ser bastante similares. No que tange aos níveis de produção, em períodos de expansão firmas tendem a serem otimistas sobre as vendas futuras e eventualmente muitos produtos fabricados acabam por não ser vendidos;

esse excesso de produtos, por sua vez, aumenta os níveis agregados de estoque das firmas que naturalmente passam a abaixar seus níveis de produção. Quando os níveis de produção estão suficientemente baixos a taxa de vendas pode exceder a taxa de produção de bens, gerando um desinvestimento de estoques que resulta em uma recessão onde preços, produção e lucros caem e o desemprego passa a prevalecer. Na próxima fase do ciclo, uma recuperação econômica é gerada por uma diminuição na taxa de liquidação dos estoques. Isso se deve ao fato de que no momento em que os custos estão baixos, firmas tendem lentamente a contratar mais funcionários, comprar mais insumos e expandir suas operações na expectativa de que os preços irão se recuperar. Com mais firmas agindo dessa forma, a circulação de dinheiro na economia passa a aumentar. Consumidores, com dinheiro para gastar novamente, passam a puxar os preços dos bens para cima. Conforme os preços sobem, mais e mais firmas passam a aumentar suas operações, acentuando a fase expansiva do ciclo. O *boom* tende à terminar assim que a competição por recursos faz com que a demanda por aumento de salários, aumento de custos das matérias-primas e aumento das taxas de juros passem a gerar maior incerteza nos agentes econômicos. Nesse momento, firmas percebem que seus estoques estão abastecidos que, novamente, não podem ser vendidos. E assim o ciclo tende a se repetir. A figura 1 representa os ciclos de negócios.

Figura 1 – Ciclo de Negócios



Fonte: Traduzido de Silver et al. (2016)

Essa introdução resumida da ligação dos níveis de estoque com a atividade

econômica de um modo geral serve para que o leitor possa compreender o fato de que as forças econômicas (expectativas racionais dos agentes econômicos) e a capacidade dos tomadores de decisão à perceber e reagir rápida e corretamente às mudanças são fatores de suma importância para a duração e magnitude de um ciclo econômico. Trazendo esse fato para o contexto operacional da tomada de decisão, entender melhor a tendência de vendas e entrada de pedidos, o volume de pedidos em *backlog*, variações e pressões dos preços (apenas para citar alguns fatores) e principalmente os sistemas de decisão utilizados pelas empresas são de suma importância para sua sobrevivência e rentabilidade frente às fases dos ciclos econômicos. De acordo com Silver, Pyke e Peterson (2016) os ciclos econômicos são bem menos voláteis do que eram há 50 anos atrás e muito disso se deve aos avanços na gestão de estoques e no planejamento, controle e programação da produção.

2.1.2 Giro de Estoque e Custos de Estoque

Usar unidades físicas como unidades de fluxo (e, portanto, como a medida de estoque) é provavelmente a maneira mais intuitiva de medir o estoque (CACHON; TERWIESCH, 2012). Podem ser veículos em uma loja de automóveis, pacientes em hospitais ou toneladas de petróleo em uma refinaria. No entanto, trabalhar com unidades físicas não é necessariamente o melhor método para obter uma medida agregada de estoque em diferentes produtos: há pouco valor em dizer que você tem 2000 unidades de estoque se 1000 delas são clipes de papel e as restantes 1000 são computadores. Em tais aplicações, o estoque é frequentemente medido em alguma unidade monetária, por exemplo, U\$5.000.000,00 em estoque. Medir o estoque em uma unidade monetária comum facilita a agregação do estoque em diferentes produtos. No entanto, essa medida é comumente inflada pela margem de lucro que as firmas aplicam para obter resultados financeiros positivos de suas operações; isto é, um dólar de vendas é medido em dólares de vendas, enquanto um dólar de estoque é medido, dada a prática contábil atual, em um dólar de custo. Portanto, a medida apropriada para a taxa de fluxo é o custo dos produtos vendidos, do inglês COGS (*cost of goods sold*).

Com essas duas medidas - taxa de fluxo e estoque - podemos aplicar a Lei de Little para calcular quanto tempo a unidade média de fluxo (nota de um dólar) gasta dentro do sistema da firma antes de ser transformada em vendas, em ponto em que as unidades de fluxo desencadearão uma entrada de lucro. Isso corresponde à definição de tempo de fluxo.

Segundo Cachon e Terwiesch (2012), a lei de Little nos propõe que:

$$\text{Estoque Medio} = \text{Tempo de Fluxo Medio} \times \text{Taxa de Fluxo Media} \quad (1)$$

Assumindo que o custo dos produtos vendidos são a unidade de fluxo, temos que:

$$Taxa\ de\ fluxo = Custo\ dos\ Produtos\ Vendidos \quad (2)$$

Assim, pela Lei de Little, temos que:

$$Tempo\ de\ Fluxo = \frac{Estoque}{Taxa\ de\ Fluxo} \quad (3)$$

Este cálculo está na base da definição de uma outra forma de medição dos estoques conhecida como dias de fornecimento. Uma empresa que tenha 80 dias em estoque significa dizer que o item médio passa 80 dias em sua cadeia de suprimentos. Da mesma forma, podemos dizer que seu estoque gira $365\text{ dias/ano}/80\text{ dias} = 4,56$ vezes por ano. Essa métrica, muito comum em todas as cadeias de suprimento, é chamada de giro de estoque.

$$Giro\ de\ Estoque = \frac{1}{Tempo\ de\ Fluxo} \quad (4)$$

Logo, o giro de estoque nada mais é que:

$$Giro\ de\ Estoque = \frac{Custo\ dos\ Produtos\ Vendidos}{Estoque} \quad (5)$$

O estoque requer investimentos financeiros substanciais pelo simples fato de que mesmo que ele seja financiado à uma taxa de juros atrativa, seus custos financeiros podem ser extremamente relevantes. Além disso, o custo de manutenção de estoque é substancialmente maior do que o mero custo de manutenção financeira por uma série de razões:

- O estoque pode se tornar obsoleto (componentes metálicos podem enferrujar e perder sua qualidade com o tempo; pães costumam ter prazos de validade extremamente baixos);
- O estoque pode desaparecer, seja por roubo ou seja por extravio;
- O estoque requer armazenamento e portanto, espaço físico, que pode custar caro;
- O estoque pode ter outros custos indiretos como seguros;

Segundo Silver, Pyke e Peterson (2016), os principais componentes de custos de estoque são:

2.1.2.1 Custo Variável Unitário, c

O valor unitário (denotado pelo símbolo c) de um item é expresso em unidades monetárias (por exemplo, dólar) por unidade de produto. Para um varejista, é simplesmente o preço (incluindo frete) pago ao fornecedor, mais quaisquer custos indiretos incorridos para torná-lo pronto para venda. Dependendo do tamanho do pedido, é bastante comum se obter descontos. Já para um produtor, o valor unitário de um item geralmente é mais difícil de determinar e raramente o “valor contábil” definido pela contabilidade tradicional é uma boa definição. O valor de um item idealmente deve medir a quantidade real de dinheiro (custo variável) que foi gasto no SKU para torná-lo disponível para uso (seja para atender à demanda do cliente ou para uso interno como um componente de alguns outros itens). Ainda que a determinação do custo unitário variável não seja uma tarefa fácil, a maioria dos modelos existentes são relativamente robustos a erros na estimativa de custos. Um bom ponto de partida é o valor do custo fornecido pela contabilidade, ajustado para possíveis erros. Por exemplo, uma pequena loja compra botas por R\$50,00 e depois contrata uma pessoa para desempacota-las e coloca-las nas prateleiras. O custo por hora do funcionário é R\$10,00. Caso esse funcionário desempacote e coloque 50 botas por hora, o custo por bota é R\$51,00. Já em uma fábrica, os custos tendem a ser mais complexos dada estrutura de maquinário e capital, energia e até mesmo mão-de-obra indireta para cada etapa do processo e cada subcomponente do produto. O valor unitário é importante por si só pois os custos totais de aquisição ou produção dependem de seu valor. Além disso, os custos de manutenção dos estoques também são função do custo variável unitário (SILVER; PYKE; PETERSON, 2016).

2.1.2.2 Custos de Manutenção dos Estoques, h

O custo de manter os itens em estoque incluem o custo de oportunidade do dinheiro investido, as despesas incorridas na operação de um armazém, custos de manuseio e contagem, os custos de deterioração de estoque, danos, roubo, obsolescência, seguro e impostos. Uma convenção comum é dada por Silver, Pyke e Peterson (2016):

$$h = I \times c \times r \quad (6)$$

I é o estoque médio em unidades, $I \times c$ é o estoque médio expresso em unidades monetárias. Já r é a taxa de manutenção dos estoques, ou seja, o custo de carregar 1 unidade monetária de estoque por alguma unidade de tempo (geralmente expressa em dia, semana, mês, trimestre ou ano).

De longe, a maior porção dos custos de manutenção dos estoques é composta por dois elementos:

- Custos de oportunidade de capital: capital que poderia ser usado em aplicações mais lucrativas para a empresa. Esses custos poderiam ser quantificados através de uma taxa de retorno de uma oportunidade mais atraente que não pôde ser aproveitada devido a uma decisão de investir os recursos disponíveis em estoques. Infelizmente, o conceito de custo marginal é difícil de implementar na prática, afinal, a oportunidade de investimento mais atraente pode mudar a qualquer momento. Isso significa que o custo da parte de capital de manutenção também deve ser alterado de um dia para o outro? Do ponto de vista teórico, a resposta é sim pois deve-se levar em conta o valor do dinheiro no tempo. Na prática, esses fatores são inviáveis de se gerenciar e por conta disso, o custo de capital é arbitrado em algum nível e só é alterado se alguma mudança relevante na estrutura de capital da empresa ocorrer (SILVER; PYKE; PETERSON, 2016). O custo do capital utilizado, é claro, depende do grau de risco inerente a um investimento (pequenas empresas muitas vezes têm que pagar taxas mais altas pois a escassez de capital somada à falta de garantias e aos riscos envolvidos elevam os custos para se obter capital de giro). Uma complicação adicional é a de que o verdadeiro custo de manutenção do estoques deve ser baseado em uma média ponderada de taxas, dado que os estoques são freqüentemente financiados por uma combinação de financiamentos, cada uma das quais pode ter uma taxa diferente. Ainda que estoques tenham relativa alta liquidez (isto é, alta capacidade de serem convertidos em dinheiro de forma rápida), o nível de estoques pode influenciar no grau de risco em que uma organização é avaliada. Além disso, fatores como obsolescência, deterioração, furtos e falta de demanda pelo preço normal podem diminuir a liquidez e tornar o custo de capital mais alto.
- Custos de armazenamento: o valor de r não depende apenas do risco relativo dos SKUs, ele também depende dos custos de armazenamento que são uma função do volume, peso, requisitos especiais de manuseio, seguro e possivelmente impostos. Essa análise detalhada raramente é aplicada a todos os SKUs no estoque.

Para tornar a decisão de estoque mais gerenciável, tanto do ponto de vista teórico quanto prático, geralmente se assume que um único valor de r se aplica à maioria dos itens.

2.1.2.3 Custos de Pedido ou Custos de Setup, K

O símbolo K denota o custo fixo (independente do tamanho do lote) associado a um reabastecimento. Para um varejista, ou seja, um membro da cadeia que apenas comercializa (não produz) esse custo é considerado o custo de se gerar um pedido. Os custos de pedido podem incluir os custos de análise, envio e acompanhamento dos

pedidos de compras, despacho, recebimento, inspeção, processamentos de faturas, pagamentos, entre outras atividades que fazem parte do fluxo material, informacional e financeiro que a movimentação de materiais entre firmas pode gerar (SILVER; PYKE; PETERSON, 2016). No que tange à ambientes industriais geralmente associados à configurações, paradas e ajustes necessários para processamentos de lotes produtivos em um ambiente industrial, leva em conta os custos dos técnicos que configuram o maquinário e o "efeito aprendizagem" que consiste no período de tempo em que as peças são produzidas com qualidade inferior e/ou velocidade mais lenta para ajuste do maquinário. No fim das contas, o efeito aprendizagem pode ser considerado um custo de oportunidade, dado que o tempo perdido para ajuste do maquinário poderia ser utilizado para a fabricação de algum outro item.

O custo de *set-up* da produção inclui muitos desses componentes e outros custos relacionados à produção interrompida. Por exemplo, podemos incluir o salário de um mecânico qualificado que precisa ajustar o equipamento de produção para esta peça. Então, uma vez que uma configuração é concluída, geralmente segue-se um período de tempo durante o qual a instalação é produzida com qualidade inferior ou velocidade mais lenta, enquanto o equipamento é ajustado e o operador se ajusta à nova peça. Os custos resultantes são considerados parte do custo de configuração porque são o resultado de uma decisão de fazer um pedido. Por fim, observe que durante o período de configuração e aprendizagem, os custos de oportunidade são, na verdade, incorridos porque o tempo de produção do equipamento está sendo perdido e nenhum outro item está sendo fabricado. Os autores levantam um interessante debate sobre as complicações existentes na contabilização desses custos. Afinal, não é simples dizer se os salários de um técnico que realiza os *set-ups* no maquinário pode ser considerado como um custo de *set-up*, dado que os salários continuarão sendo pagos com mais ou menos *set-ups*. Sob um ponto de vista de operações, esse salário pode ser considerado um custo de *set-up* dependendo do uso do tempo desse funcionário e se uma perspectiva de longo prazo for adotada (SILVER; PYKE; PETERSON, 2016). A visão de longo prazo sugere que os salários devem ser incluídos como custos de *set-up* pois o trabalhador pode ser demitido (ou seu tempo pode ser utilizado de alguma outra forma), de modo que a decisão de realizar ou não um *set-up* raramente afeta o dinheiro que a empresa paga (nesse sentido, virtualmente todos os custos são variáveis dado que pessoas podem ser demitidas, fábricas fechadas, etc). Sob uma visão de curto prazo, o custo do tempo do técnico é fixo e por isso pode-se argumentar que o mesmo não deve fazer parte dos custos de *set-up*. Nesse sentido, podemos entender que o custo de *set-up*, A, pode ser aplicado a decisões que são repetidas por um longo período de tempo (por exemplo, um ano) e então considerar as horas de trabalho do técnico de maquinário como parte desse custo. No fim das contas, o importante é entender que de fato existe um custo de oportunidade e é importante

encontrar uma maneira de racionalizar e mensurar os custos que são importantes para a tomada de decisão. Afinal, "se o que você faz não afeta o custo, o custo não deve afetar o que você faz."

2.1.3 Razões para a existência dos estoques

Agora que é possível entender a contextualização, a lei de Little e os custos associados à decisões de estoque, é importante destrinchar bem os motivos que fazem com que exista estoque em processo. Conforme Cachon e Terwiesch (2012), o estoque reflete um desvio entre a entrada de um processo e sua saída. Groote (1994) discute cinco razões para manter estoque, isto é, cinco razões para ter a linha de entrada diferente da linha de saída: (1) o tempo que uma unidade de fluxo gasta no processo, (2) sazonalidade da demanda, (3) economias de escala, (4) separação de etapas em um processo e (5) estocacidade da demanda. Dependendo do motivo para manter o estoque, os estoques recebem nomes diferentes: estoque de pipeline, estoque sazonal, estoque de ciclo, estoque de desacoplamento/*buffers* e estoque de segurança. Deve-se notar que essas cinco razões não são necessariamente excludentes e que, na prática, normalmente existe mais de uma razão para manter estoque. Uma abordagem direta seria considerar "vendas" como o fluxo resultante.

- Estoque de Pipeline

Essa primeira razão para o estoque reflete o tempo que uma unidade que flui no processo gasta para ser transformada de *input* para *output* (GROOTE, 1994). Basicamente se refere ao estoque básico no qual o processo opera como estoque de pipeline.

Vamos tomar como exemplo uma empresa que produz sapatos. Se cada sapato demora exatamente 10 minutos para ser processado pela máquina de costura, e que à cada 5 minutos um novo sapato chega do processo anterior para ser processado. A Lei de Little nos fornece o estoque de *pipeline*, dado que temos o tempo de fluxo (10 minutos) e a taxa de fluxo (1 sapato à cada 5 minutos). Se convertermos em horas, temos que:

$$\text{Estoque} = 12(\text{sapatos/hora}) \times \frac{10}{60}(\text{horas}) = 2\text{sapatos} \quad (7)$$

O estoque de *pipeline* não é válido apenas para os estoques de processo dentro de uma fábrica. Caso exemplo se tratasse de uma empresa distribuidora que compra e revende sapatos, teríamos uma lógica similar em que a taxa de fluxo seria a demanda média dos clientes e o tempo de fluxo seria o tempo médio de entrega dos sapatos. Nesse sentido, caso a empresa tivesse uma demanda

média de 350 sapatos por semana e o tempo de entrega dos sapatos pelos fabricantes fosse de duas semanas, o estoque médio seria de 700 sapatos.

Em certos ambientes é bastante comum ouvir gerentes almejando o "estoque zero no processo." A lei de Little deixa claro que só é possível atingir um estoque igual a zero caso o tempo de fluxo seja zero (ou seja, a unidade em processo na verdade não é processada) ou caso a taxa de fluxo seja zero (ou seja, não entram unidades no sistema). É impossível operar sem estoque em processo! No entanto, a Lei de Little também nos indica a melhor maneira de reduzir o estoque de pipeline. Como reduzir a taxa de fluxo (e com isso a demanda e o lucro) normalmente não é uma opção desejável, a única outra maneira de reduzi-lo é reduzindo o tempo de fluxo.

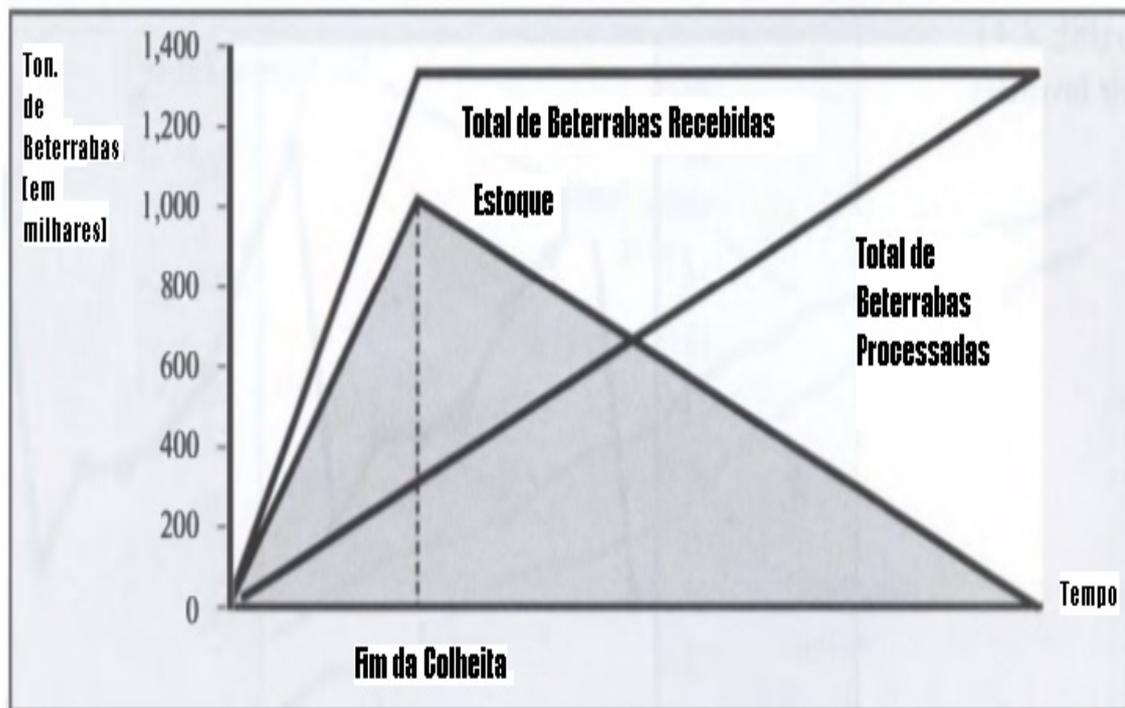
- **Estoque Sazonal**

O estoque sazonal acontece quando temos uma capacidade fixa frente à uma demanda variável. Imagine uma fábrica de biquínis e roupas de banho. No hemisfério sul, as vendas desses itens costumam ter um pico entre dezembro e março por conta do verão. Dado que a capacidade é rígida, essa fábrica provavelmente irá iniciar sua produção com alguns meses de antecedência para atender a demanda prevista para esse período (GROOTE, 1994). De fato a firma poderia esperar um pouco mais para iniciar a produção objetivando não construir estoque, mas construir a capacidade necessária seria muito mais caro e complexo (por conta do maquinário e mão-de-obra), além do fato que essa mesma capacidade seria desmontada no fim do verão por conta da consequente diminuição na demanda. Isso significa dizer que enquanto for caro adicionar e subtrair capacidade, as empresas desejarão suavizar e regularizar sua produção em relação às vendas através do estoque sazonal.

Cachon e Terwiesch (2012) trazem um exemplo de um caso extremo. Estoque sazonal pode ser encontrado no setor agrícola e de processamento de alimentos. Devido à natureza da estação de colheita, a Monitor Sugar, uma grande cooperativa de açúcar de beterraba no meio-oeste dos EUA, coleta toda a matéria-prima para a produção de açúcar em um período de seis semanas. No final da safra, elas acumularam uma pilha de beterraba sacarina, cerca de 1 milhão de toneladas, na forma de uma pilha de beterraba sacarina de 67 acres. Tendo em vista que o processamento de alimentos é uma operação de capital intensivo, o processo é dimensionado de forma que as 1,325 milhão de toneladas de beterraba recebidas e o quase 1 milhão de toneladas de estoque que se constroem permitem a operação ininterrupta da planta de produção até o início da próxima safra. Assim, conforme ilustrado pela Figura 2. A produção e, portanto, o fluxo de saída

do produto, é quase constante, enquanto o fluxo de entrada do produto é zero exceto para a época de colheita.

Figura 2 – Estoque Sazonal



Fonte: Traduzido de Cachon e Terwiesch (2008)

- Estoque de Ciclo

Existem inúmeras situações em que é mais eficiente e econômico processar várias unidades de fluxo coletivamente em um determinado momento visando aproveitar as economias de escala das operações, seja um lote de compra ou um lote de produção. Um exemplo claro seriam as economias geradas em processos de transporte, onde independente de um caminhão ser despachado vazio ou cheio, o salário do motorista é fixo e uma parte considerável do desgaste do caminhão (e portanto, da cobrança pelo serviço) depende da quilometragem percorrida (e não necessariamente da carga). Isso basicamente significa dizer que a remessa do caminhão incorre em um custo fixo que não depende da quantidade transportada (GROOTE, 1994). Visando mitigar e diluir os custos fixos em uma maior quantidade, uma boa solução seria carregar o caminhão inteiro mesmo que não haja demanda imediata para consumir toda a carga. Outro exemplo de estoque de ciclo é o estoque gerado pelo processamento de um lote de produção maior do que a demanda visando otimizar os custos de *set-up*. Conforme mencionado anteriormente, cada configuração no maquinário para fabricar uma nova peça gera um custo financeiro e um custo econômico, fixos,

que independe da quantidade a ser fabricada. Nesse sentido, transportes e set-ups produtivos são exemplos análogos (um para lotes de compra enquanto o outro para lotes produtivos).

- Estoques de Desacoplamento/*Buffers*

Estoque entre diferentes etapas de um processo podem servir como buffers e acabam permitindo com que elas operem de maneira independente uma das outras (GROOTE, 1994). Imagine uma linha de montagem de computadores onde um operador monta os computadores enquanto o outro testa sua funcionalidade. Um *buffer* de computadores montados permitirá que o montador possa parar de trabalhar (seja fazendo uma pausa para ir ao banheiro, comer, consertar suas ferramentas ou maquinário) enquanto o testador pode continuar trabalhando. Isso significa dizer que os *buffers* podem absorver variações nas taxas de fluxo agindo como uma fonte de fornecimento para uma etapa do processo à jusante, mesmo que a operação anterior não seja capaz de criar esse fornecimento em um determinado momento. Na ausência de tais *buffers*, uma interrupção em qualquer uma das estações levaria à interrupção de todas as outras estações, à montante e à jusante.

- Estoque de Segurança

A razão final que justifica a existência dos estoques é considerada por muitas pessoas a mais óbvia e ao mesmo tempo a mais desafiadora. A demanda tática refere-se ao fato de que precisamos nos proteger de erros de previsão, dado que muito raramente a demanda prevista será igual a realizada (isso é diferente de variações na demanda previsível, que é chamada de sazonalidade, como o pico de vendas de roupas de banho que vimos no exemplo anterior). Nesse sentido, a demanda estocástica pode estar presente em conjunto da demanda sazonal (ou seja, mesmo que por conta da sazonalidade na demanda um pico de vendas seja previsto no verão, a estocacidade da demanda faz com que existam variações em torno dessa previsão conhecida). A demanda estocástica é um problema especialmente significativo em ambientes de varejo ou no nível de produtos acabados de vários fabricantes: mesmo que se faça uma boa previsão para a demanda, na melhor das hipóteses elas estarão corretas na média. Produzir ou comprar demais e pode gerar sobras de estoque. Produzir ou comprar de menos pode gerar uma perda valiosa de vendas e por isso o dimensionamento correto dos estoques de segurança tem um papel importante para atender às necessidades da firma.

O sucesso de um empreendimento depende de sua capacidade de fornecer serviços a clientes ou usuários e de permanecer financeiramente viável. Para uma

organização que fornece bens a seus clientes, a principal atividade é ter produtos adequados disponíveis a um preço aceitável dentro de um prazo razoável (WILD, 2002). Muitas partes de uma empresa estão envolvidas na criação dessa situação. Inicialmente, são os departamentos de marketing e design. Em seguida, a compra e, em alguns casos, a fabricação está envolvida. Para um item que já se encontra no mercado, a principal atividade é dar continuidade ao fornecimento aos clientes. O controle de estoque é a atividade que organiza a disponibilidade de itens aos clientes. Ele coordena as funções de compra, fabricação e distribuição para atender às necessidades de marketing. Essa função inclui a gestão de matérias-primas, produtos acabados, consumíveis, peças de reposição, itens obsoletos e todos os outros suprimentos. O estoque permite que uma empresa dê suporte às atividades de atendimento, logística ou manufatura em situações em que a compra ou fabricação dos itens não seja capaz de atender a demanda.

Além de tudo isso, é importante ressaltar que controle de estoque existe em uma encruzilhada nas atividades de uma empresa. Muitas das atividades dependem do nível correto de estoque mantido, mas a definição do termo nível correto varia dependendo de qual atividade está definindo o estoque. O controle de estoque é definitivamente um ato de equilíbrio entre os requisitos conflitantes da empresa e a razão principal para o desenvolvimento da gestão de estoque é resolver esse conflito no melhor interesse do negócio. Uma organização de fornecimento convencional terá muitos departamentos, incluindo vendas, compras, finanças, qualidade, contratos e administração geral (WILD, 2002). Em alguns casos, também haverá serviços de fabricação, distribuição ou suporte ou uma variedade de atividades específicas do setor. Cada um deles tem uma visão particular da função do controle de estoque.

Vendas consideram que um bom controle de estoque permite que a empresa tenha à disposição qualquer item que atenda às vendas imediatas na quantidade demandada: isso requer um grande estoque. O setor de compras considera que o controle de estoque oferece a oportunidade de aquisição de bens para que os preços ótimos sejam obtidos. Comprar itens em grandes quantidades geralmente reduz o preço de compra e melhora a eficiência do departamento de compras. Finanças, por sua vez, têm problemas com o estoque pelo fato de que estoques consomem grandes quantidades de capital de giro e atrapalham o fluxo de caixa. Ainda que possam ser feitas provisões no caso de o estoque se tornar invendável (ajustando esse valor para modificar o valor do lucro em momentos de bons ou maus resultados financeiros), a existência dessas disposições (geradas por um mal controle de estoque) é sem dúvidas prejudicial para as finanças da empresa. Para a qualidade, altos níveis de estoques aumentam os riscos de obsolescência e avarias. Além disso, realizar as devidas verificações e inspeções no estoque acabam por gerar um efeito de desacelerar o andamento e giro do estoque. Essa introdução de mais processamento aos estoques significa que a qualidade pode

trabalhar em oposição ao objetivo de um bom controle de estoques. Ainda que isso venha a acontecer, a criação de rigorosos padrões de qualidade e desenvolvimento de fornecedores por parte desse departamento vem garantindo maior conformidade aos materiais, permitindo com que as inspeções e verificações sejam minimizadas, reduzindo assim os conflitos. Já o time de manufatura (quando existente) é de que grandes lotes são desejáveis por reduzirem os custos diretos de produção; além disso, grandes estoques permitem que os objetivos desse time (aumentar a eficiência das máquinas e mão-de-obra) sejam alcançados e os protegem de interrupções causadas por escassez, quebras e mudanças na demanda. A administração geral, por sua vez, vê o controle de estoque como uma fonte de informação. Alguns gestores consideram que devem ser capazes de usar o controle de estoque para fornecer informações imediatamente, estatísticas e previsões. Isso pode resultar em uma grande quantidade de trabalho não estruturado, coletando, analisando e fornecendo informações. Bons controladores de estoque (ou gestores de materiais) manterão o estoque baixo, desde que sejam responsáveis pelos estoques de tudo, incluindo matérias-primas, estoques acabados e semiacabados, consumíveis, ferramentas, material em processo e, de fato, todos itens de estoque. É sempre importante lembrar que altos estoques não são sinônimo de alta disponibilidade. Fica a cargo do gerente de estoques (que pode também ser chamado de gerente de materiais, planejador ou controlador de estoque, comprador ou controlador de logística) a garantia de que os estoques estarão em equilíbrio, buscando sempre ajustar à oferta a demanda através dos ajustes necessários nos métodos operacionais (WILD, 2002).

Como bem elenca Wild (2002), é essencial que o objetivo geral do controle do estoque esteja bem definido. Como todas as outras atividades da empresa, o gerenciamento de estoque deve contribuir para o bem-estar de toda a organização. O objetivo da operação logística não é simplesmente disponibilizar todos os itens o tempo todo (dado que isso pode prejudicar as finanças) mas sim "contribuir para o lucro, atendendo às necessidades de marketing e financeiras da empresa". É de se imaginar que a política mais lucrativa não consiste em otimizar um dos objetivos em detrimento dos outros. O controlador de estoque deve fazer julgamentos de valor. Se faltar lucro, a empresa fecha no curto prazo. Se o atendimento ao cliente for ruim, os clientes desaparecem e a empresa fecha as portas a longo prazo. Equilibrar os aspectos financeiros e de marketing é a resposta: existe um juízo de valor a ser feito.

2.1.4 Teoria de Estoques e Sistemas de Reposição

Qual deve ser o tamanho de uma reposição de estoque? Quando uma reposição de estoque deve ser feita? Como as empresas utilizam da pesquisa operacional para responder a essas perguntas?

Essas duas decisões são entradas críticas em um programa de gerenciamento

de estoques que normalmente tem o objetivo de fornecer um nível desejado de serviço ao cliente a um custo mínimo. O primeiro modelo de decisão para auxiliar os gerentes na determinação do tamanho e do momento de uma ordem de reabastecimento de estoque apareceu dez décadas atrás com a contribuição do *economic order quantity* (EOQ) de Harris em 1915 (BUSHUEV *et al.*, 2015).

Ainda segundo Bushuev *et al.* (2015), desde à introdução do modelo do EOQ de Harris, a literatura sobre os modelos de estoques vem continuamente se expandindo em suas tentativas de responder às perguntas fundamentais sobre quanto pedir e quando fazer um pedido. Inúmeras variantes e extensões do EOQ apareceram rapidamente na literatura. Três destaques selecionados dessa evolução da pesquisa, desde Harris até a década de 1950, que ajudaram a formar a base de modelos clássicos de inventário incluem o desenvolvimento do modelo *economic production quantity* (EPQ), o conceito de *reorder point* (RP) e o EOQ estocástico. Taft (1918, apud BUSHUEV *et al.*, 2015) relaxou a suposição de fornecimento instantânea do EOQ no desenvolvimento do modelo EPQ. Basicamente, o trabalho de Taft considera que os itens são produzidos um por vez, como em uma linha de montagem e não em lotes em que toda a quantidade para atender à ordem fica pronta de uma só vez (como em um forno, por exemplo). A suposição de disponibilidade simultânea de toda a quantidade do pedido é apropriada para situações em que as organizações comprem itens de fornecedores externos porque geralmente chegam em lotes completos de transporte, mas o modelo EPQ é mais aplicável a ambientes de produção de linha de montagem de unidade única. Wilson (1934, apud BUSHUEV *et al.*, 2015) introduziu o conceito de ponto de reposição, que representou uma das primeiras tentativas de trabalhar com considerações probabilísticas no gerenciamento de estoques. O EOQ estocástico foi introduzido por (WAGNER; WHITIN, 1954).

Ainda na década de 70, Aggarwal (1974) conta que com o avanço da teoria matemática de estoques e crescente disponibilidade de processamento computacional, mais e mais empresas foram desistindo do uso de fórmulas clássicas de EOQ (o que não significa que elas ainda não sejam utilizadas nos dias de hoje). Essas fórmulas são mais comumente derivadas usando suposições estáticas (ou seja, taxa de demanda constante, *lead time* constante, etc.) e, portanto, são designadas como modelos estáticos. Há um grande número de outras fórmulas baseadas no pressuposto de uma ou mais das variáveis (taxa de demanda, *lead time* ou elementos de custo que afetam o custo total do estoque), sendo de natureza em constante mudança. Esses modelos são conhecidos como modelos dinâmicos. Os modelos dinâmicos exigem uma quantidade considerável de esforço computacional e, hoje em dia, felizmente, a maioria das grandes empresas está bem equipada para lidar com esses modelos.

Nos próximos tópicos desse trabalho partimos para uma compreensão das políticas de reposição e para uma revisão mais detalhada da taxonomia e do estado-

da-arte da modelagem de estoques.

2.1.4.1 Principais componentes e classificação dos modelos de estoque

Os modelos matemáticos de estoque podem, em um primeiro momento, ser divididos em duas categorias amplas - modelos determinísticos e modelos estocásticos. Essa divisão está ligada à previsibilidade da demanda: se a demanda em períodos futuros pode ser prevista com considerável precisão, é razoável usar uma política de estoque que pressupõe que todas as previsões serão sempre totalmente precisas (modelos determinísticos). Por outro lado, quando a demanda não pode ser prevista com razoável acurácia, torna-se necessário usar um modelo de estoque estocástico onde a demanda em qualquer período é uma variável aleatória ao invés de uma constante conhecida (HILLIER; LIEBERMAN, 2014). Além dos principais custos abordados na seção 2.1.3, uma série de modelos incluem também os custos de escassez e podem incluir vários outros componentes.

Segundo Axsater (2006), se um item é exigido e não pode ser entregue devido à falta, vários custos podem ocorrer. Existem situações em que um cliente concorda em esperar enquanto seu pedido entra na carteira, mas também situações em que o cliente escolhe outro fornecedor. Se o pedido do cliente estiver atrasado, muitas vezes há custos extras de administração, descontos nos preços para entregas atrasadas, manuseio de material e transporte. Se a venda for perdida, a contribuição da venda também será perdida. Em qualquer caso, geralmente significa uma perda de boa vontade que pode afetar as vendas a longo prazo. A maioria desses custos é difícil de estimar. Os custos de escassez na produção são, em geral, ainda mais difíceis de estimar. Se um componente estiver faltando, por exemplo, isso pode causar uma cadeia de consequências negativas como atrasos, reprogramação, etc. Existem também situações em que os custos de falta são fáceis de avaliar. Suponha, por exemplo, que um componente ausente possa ser comprado por um preço mais alto em uma loja ao lado. Podemos então usar o custo adicional como nosso custo de escassez. Como os custos de escassez são difíceis de estimar, é muito comum substituí-los por uma restrição de serviço adequada. Obviamente, também é difícil determinar um nível de serviço adequado, mas ainda assim isso é considerado um pouco mais simples em muitas situações práticas. Ainda assim, a motivação para uma restrição de serviço é quase sempre algum custo de escassez subjacente.

Hillier e Lieberman (2014) argumentam que a receita pode ou não ser incluída no modelo. Se tanto o preço quanto a demanda do produto são estabelecidos pelo mercado e, portanto, estão fora do controle da empresa, a receita das vendas (assumindo que a demanda seja atendida) é independente da política de estoque da empresa e pode ser negligenciada. No entanto, se a receita for negligenciada no modelo, a perda na receita deve ser incluída no custo de escassez sempre que a empresa não puder

atender à demanda e a venda for perdida. Além disso, mesmo no caso de demanda em atraso, o custo do atraso na receita também deve ser incluído no custo de falta. Com essas interpretações, a receita não será considerada explicitamente no restante deste capítulo.

Já o valor residual de um item, outro componente que pode ser incluído nos modelos, é o valor de um item restante quando não se deseja mais mantê-lo em estoque. O valor residual representa o valor de venda que a empresa dá a esse item que não mais a interessa, talvez por meio de uma venda com desconto. O negativo do valor residual é chamado de custo residual. Se houver um custo associado ao descarte de um item, o custo de recuperação pode ser positivo. Assumimos a partir de agora que qualquer custo residual é incorporado ao custo de manutenção.

Colocar todos os modelos de estoque publicados em um formato sistemático é praticamente impossível. Uma revisão abrangente de todos os modelos de estoques publicados desde 1913 nunca foi realizada e seria uma tarefa assustadora devido ao grande número de modelos de estoque publicados. Essa opinião foi expressa pela primeira vez há 54 anos no artigo de revisão de literatura de inventário inicial de Veinott (1966). O amplo escopo da disciplina de pesquisa em gerenciamento de estoques continuou a aumentar drasticamente, como é evidente pelos 2,6 milhões de ocorrências resultantes de uma pesquisa usando a frase "modelo de estoque" no Google Scholar (BUSHUEV *et al.*, 2015). Nessa literatura em rápido crescimento, diferentes pesquisadores incluíram diferentes números e tipos de variáveis em seus modelos e, como resultado, o número total de modelos de estoques têm aumentado em uma taxa muito rápida. Segundo Aggarwal (1974), as principais variáveis (ou parâmetros) e os tipos de cada um deles são:

1. Tipos de demanda:

- Constante;
- Distribuição conhecida;
- Distribuição desconhecida;

2. Funções dos elementos de custo (custos de pedido, custos de manutenção e custos de escassez) podem ser:

- Lineares;
- Côncavas;
- Convexas;

3. *Lead times*:

- Zero;

- Constante;
 - Distribuição conhecida;
 - Distribuição desconhecida;
 - Dependente do estado do sistema (número de ordens pendentes);
4. Variações nas quantidades recebidas/produzidas em comparação às quantidades pedidas:
- 100pp recebidas;
 - Distribuição de quantidades recebidas conhecida;
 - Distribuição de quantidades recebidas desconhecida;
5. Interdependência entre às demandas por diferentes itens:
- Item único;
 - Vários itens;
6. Interdependência entre localizações e/ou níveis:
- Único nível/única localização;
 - Várias localizações;
 - Vários níveis;
 - Várias localizações e vários níveis;
7. Desconto dos custos futuros:
- Fator de desconto α constante;
 - Fator de desconto α variável;
8. Vários tipos de restrições:
- Com ou sem restrições de armazenamento;
 - Capital para manutenção de estoques limitado ou ilimitado;
 - Com ou sem limitação na capacidade produtiva ou no fornecimento de fornecedores;
 - Com ou sem limite no tamanho dos pedidos;
 - Com ou sem restrições de tamanho mínimo de pedido;
 - Com ou sem restrição de tamanho do pedido em lote completo;
9. Políticas de backloging:

- Sem backlogging (pedidos são perdidos);
- Backlogging parcial (alguns pedidos são perdidos, outros entram em carteira);
- Backlogging total (todos os pedidos entram em carteira);

10. Condições de obsolescência ou de perecibilidade dos produtos:

- Sem deterioração com o tempo;
- Deterioração com o tempo acompanhada de uma proporcional perda no valor do produto;

11. Tipos de horizonte de planejamento:

- Finito;
- Infinito;

Esse conjunto de fatores evidenciam a infinidade de modelos que podem existir na literatura. Nas próximas seções passaremos por alguns dos modelos mais básicos, seus métodos de resolução, bem como suas características em relação à demanda, custos e outros fatores.

2.1.4.2 Modelos de estoques para sistemas de único nível com demanda determinística e constante

2.1.4.2.1 *EOQ - Economic Order Quantity*

O simples fato universal de organizações terem de responder ao quando e quanto comprar é o que mantém o modelo EOQ clássico de Harris vivo até hoje. Basicamente, esse modelo prescreve a quantidade ótima de compra que minimiza o custo total de estoque (composto pelos custos de pedido e custos de manutenção de estoque) sob um conjunto relativamente restrito de premissas. Consoante com Drake e Marley (2014), mesmo com essas restrições, é impossível exagerar a influência que o modelo EOQ teve sobre um século de pesquisadores e profissionais nas áreas de gerenciamento de operações e pesquisa operacional. Isso ocorre principalmente porque o modelo é a base para literalmente milhares de estudos posteriores que relaxaram um subconjunto de suas premissas para criar modelos modificados que melhor se adaptem a um ambiente de decisão específico. Além disso, o modelo EOQ original, na sua forma não ajustada, permanece relevante porque é amplamente utilizado na prática, ainda que organizações possam eventualmente aplicá-lo incorretamente em situações em que não é a melhor solução prática, principalmente por conta de sua simplicidade e robustez. O modelo também é ministrado na maioria dos cursos acadêmicos que cobrem o controle de estoque, mesmo que em pequena escala. Ele prova ser um método

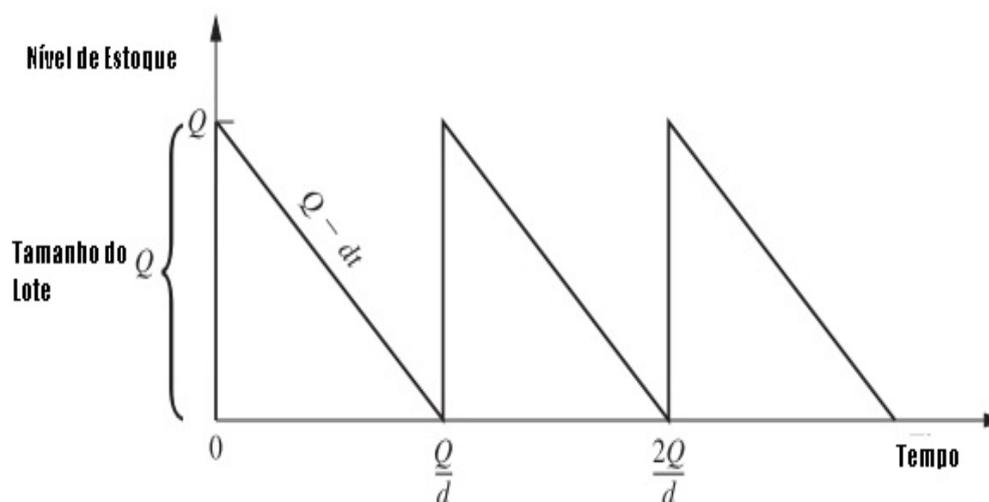
eficaz para expor estudantes e profissionais às principais compensações de custos no controle de estoque - custos de pedidos versus custos de manutenção (DRAKE; MARLEY, 2014).

Assim sendo, podemos dizer que o modelo EOQ clássico trata-se de um modelo determinístico de revisão-contínua (ao longo do trabalho será apresentada a diferença entre a revisão contínua e a revisão periódica) onde os níveis de estoque são consumidos ao longo do tempo e então repostos pela chegada de um lote onde todas as Q unidades chegam simultaneamente no tempo pedido. É importante lembrar que esse modelo serve tanto para produtos comprados externamente quanto para produtos fabricados internamente. Nesse caso, os custos unitários e custos de pedido assumem conotações diferentes. Suas principais premissas são:

- Quantidade do pedido (Q): a quantidade do pedido para repor o estoque é entregue toda de uma só vez, quando o estoque cai para zero.
- Demanda (D): a demanda anual para o item, D , é determinística e ocorre a uma taxa constante ao longo do tempo. Essa suposição é especialmente problemática em situações em que a demanda varia de mês para mês ou de estação para estação ao longo do ano. Silver et al. (1998) argumentam que se o coeficiente de variação ao quadrado for menor que 0,2 a variação da demanda de período para período é suficientemente baixa e portanto o modelo original de EOQ com demanda constante pode ser usado sem uma grande degradação nos resultados; quando a variação na demanda de período para período é alta, as empresas devem utilizar um modelo que considere essa variação, como o algoritmo Wagner e Whitin que será discutido posteriormente.
- Custo unitário (c): o custo unitário do item, c , é conhecido e fixo ao longo do horizonte de planejamento. Essa é uma suposição razoável na prática quando as empresas negociam um contrato de longo prazo a preço fixo para o item (no caso de um material comprado externamente). Existem extensões do modelo EOQ original para situações de desconto por quantidade ou itens sujeitos a inflação significativa. Alguns desses modelos são discutidos nas seções subseqüentes do trabalho.
- *Lead time* (L): os *lead times* de pedidos, L , são conhecidos e constantes. Essa premissa se aplica na prática quando a empresa possui um fornecedor de alta qualidade que atende pedidos de forma consistente no mesmo período de tempo. Essa situação se torna menos aplicável na prática quando os fornecedores estão localizados longe da empresa, porque as remessas passam mais tempo em trânsito e estão sujeitas a mais incerteza em relação às condições de transporte e controle aduaneiro nas fronteiras internacionais.

- Custo de pedido (K): o custo do pedido (ou de setup) da empresa, K , é fixo e independente do tamanho da quantidade do pedido.
- Custo de manutenção (h): custo de manutenção no estoque por unidade por período de tempo mantido no estoque é fixo e conhecido.
- Nenhuma capacidade ou limitações financeiras se aplicam à empresa ou seu fornecedor. Isso é especialmente aplicável a produtos para estoque disponíveis imediatamente no centro de distribuição de um fornecedor, bem como a itens baratos para os quais a empresa possui amplas reservas de caixa para pagar pedidos.
- Não há falta de estoque; isto é, a empresa solicita itens suficientes para satisfazer toda a demanda quando ela ocorre. No entanto, em outros modelos pode ser demonstrado que se o custo da encomenda em atraso for suficientemente baixo, a empresa poderá reduzir seu custo total mesmo deliberadamente deixando uma demanda pendente.

Figura 3 – Diagrama do Nível de Estoque em Função do Tempo para o modelo EOQ



Fonte: Traduzido de Hillier e Lieberman (2014)

O tempo entre reabastecimentos consecutivos de estoque (os segmentos de linha vertical na Figura) é chamado de ciclo.

O custo total por unidade de tempo T é obtido pelos seguintes componentes:

$$\text{Custo de pedido por ciclo} = K + cQ \quad (8)$$

O nível médio de estoque durante um ciclo é $(Q + 0)/2 = Q/2$ unidades, e o custo correspondente é $hQ/2$ por unidade de tempo. Como a duração do ciclo é Q/D , temos que:

$$\text{Custo de man. por ciclo} = \frac{hQ^2}{2D} \quad (9)$$

Portanto,

$$\text{Custo Total por ciclo} = K + cQ + \frac{hQ^2}{2D} \quad (10)$$

Assim sendo, o custo total por unidade de tempo é:

$$T = \frac{K + cQ + \frac{hQ^2}{2D}}{Q/D} = \frac{DK}{Q} + Dc + \frac{hQ}{2} \quad (11)$$

O valor de Q (chamaremos de Q^*), que minimiza T é encontrado definindo a primeira derivada como zero (e observando que a segunda derivada é positiva), o que gera:

$$-\frac{DK}{Q^2} + \frac{h}{2} = 0 \quad (12)$$

Logo,

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DK}{h}} \quad (13)$$

que nada mais é do que a bastante tradicional fórmula do EOQ, cujo tempo de ciclo (t^*) é dado por:

$$t^* = \frac{Q^*}{D} = \sqrt{\frac{2K}{Dh}} \quad (14)$$

Como bem lembram Drake e Marley (2014), uma verificação rápida das premissas fundamentais do modelo EOQ sugere que elas são tão restritivas que esse modelo se aplicaria apenas a muito poucos produtos na prática, o que na verdade não significa que o mesmo não seja ou não deva ser utilizado pelas empresas. Ainda que as críticas existam e sejam válidas, dado que as premissas do modelo EOQ podem ser violadas em um sentido técnico, existem muitas situações em que a performance do modelo é boa o suficiente para ajudar as firmas a reduzirem seus custos com estoque. Não podemos nunca nos esquecer da máxima "todos os modelos estão errados, mas alguns deles são úteis", que certamente se aplica aqui.

Ainda em conformidade com Drake e Marley (2014), a principal razão pela qual o modelo EOQ original ainda é usado com tanta frequência na prática é a diferença entre o custo agregado que as empresas incorrem ao aplicar o modelo EOQ a situações em vez de modelos mais complexos que capturam melhor as circunstâncias no cenário de negócios específico e o aumento custo de implementação de um dos modelos mais complexos em comparação com o EOQ original. Todos concordam que a própria fórmula EOQ é relativamente simples de calcular e implementar. Fulbright

(1979) mostra que o modelo EOQ é relativamente robusto a erros na estimativa dos parâmetros de custo do modelo. Isso se deve ao fato de que a função de custo anual relevante total é relativamente plana em torno da quantidade ideal.

2.1.4.2.2 EOQ com descontos de quantidades

Uma das mais severas suposições do modelo EOQ básico mencionado na seção anterior era a de que o custo unitário (c) não dependia da quantidade de reposição. Na prática é extremamente comum que economias relevantes sejam geradas através dos descontos por quantidade, seja sobre o preço básico da compra ou sobre os custos de transporte, e por conta disso devemos modificar o EOQ para lidar com esse tipo de condição. Dolan (1987) mostra uma série de exemplos de descontos para quantidade, evidenciando que essas estruturas podem ser bastante variadas. O custo unitário de um item agora depende da quantidade do lote. Em particular, é fornecido um incentivo para fazer um pedido grande, substituindo o custo unitário de uma pequena quantidade por um custo unitário menor para cada item em um lote maior, e talvez por custos unitários ainda menores para lotes ainda maiores.

A partir dos resultados para o modelo EOQ básico, o custo total por unidade de tempo T_j se o custo unitário for c_j é dado por:

$$T_j = \frac{DK}{Q} + Dc_j + \frac{hQ}{2}, \quad (15)$$

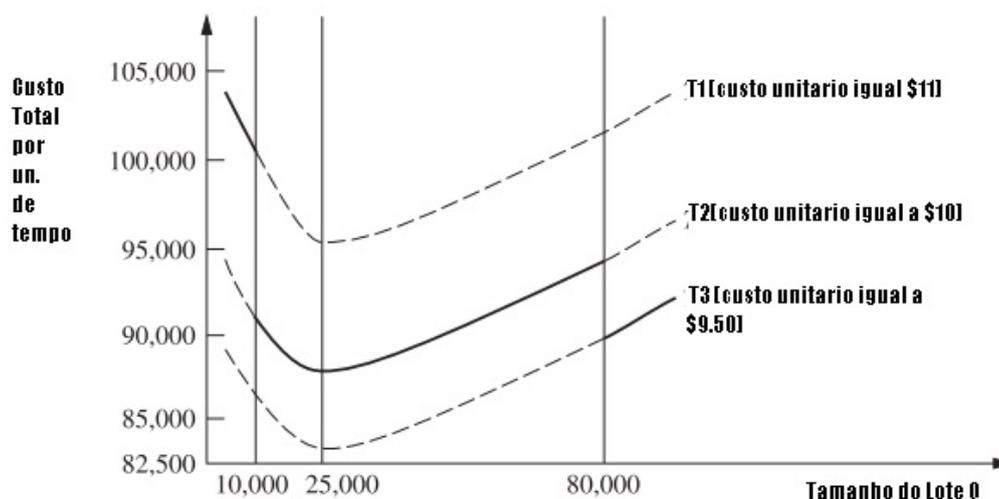
para $j = 1, 2, 3$

Um gráfico de T_j versus Q é mostrado na figura 4 com exemplos numéricos para cada j , onde a parte sólida de cada curva se estende ao longo da faixa viável de valores de Q para essa categoria de desconto. Para cada curva, o valor de Q que minimiza T_j é encontrado da mesma forma que para o modelo EOQ básico. Note que essa expressão assume que h é independente do custo unitário dos itens, mas um pequeno refinamento comum seria tornar h proporcional ao custo unitário para refletir o fato de que o custo de capital vinculado ao estoque varia dessa forma. Se h não fosse independente do custo unitário dos itens, então o valor de minimização de Q seria ligeiramente diferente para as diferentes curvas. Um resumo de um procedimento geral para o EOQ com descontos de quantidade é dado a seguir:

1. Para cada custo unitário disponível c_j , use a fórmula EOQ para o modelo EOQ para calcular sua quantidade ótima de pedido Q_j^* ;
2. Para cada c_j onde Q_j^* está dentro da faixa viável de quantidades de pedido para c_j , calcule o custo total correspondente por unidade de tempo T_j .

3. Para cada c_j onde Q_j^* não está dentro dessa faixa viável, determine a quantidade do pedido Q_j que está no ponto final dessa faixa viável que está mais próxima de Q_j^* . Calcule o custo total por unidade de tempo T_j para Q_j e c_j .
4. Compare o T_j obtido para todos os c_j e escolha o T_j mínimo. Em seguida, escolha a quantidade do pedido Q_j obtida na etapa 2 ou 3 que fornece esse T_j mínimo.

Figura 4 – Custo total por unidade de tempo com descontos



Fonte: Traduzido de Hillier e Lieberman (2014)

2.1.4.2.3 EOQ com atrasos

Como bem apontam Hillier e Lieberman (2014), uma das maiores dores de cabeça que um gerente de estoque pode ter é a ocorrência da falta de estoque, ou seja, a ocorrência de uma demanda que não pode ser atendida imediatamente por conta da falta de material. Isso é um problema pois poderá deixar os clientes insatisfeitos e gerará um maior processamento operacional para lidar com as ordens em atraso. Ao presumir que a escassez planejada não é permitida, o modelo de EOQ básico satisfaz o objetivo dos gerentes que é evitar a escassez o máximo possível. No entanto, faltas não planejadas ainda podem ocorrer se a taxa de demanda e as entregas não permanecerem dentro do cronograma. Além disso, existem situações em que permitir uma escassez planejada limitada faz sentido sob um ponto de vista gerencial: por exemplo, se os clientes estiverem dispostos a aceitar um atraso razoável no abastecimento de seus pedidos, os custos de escassez (incluindo os custos de negócios futuros perdidos) não deve ser exorbitante. Nesse sentido, reduzir o nível médio de estoque, permitindo breves escassezes ocasionais, pode ser uma decisão racional (HILLIER; LIEBERMAN, 2014). Assim sendo, o modelo EOQ com atrasos

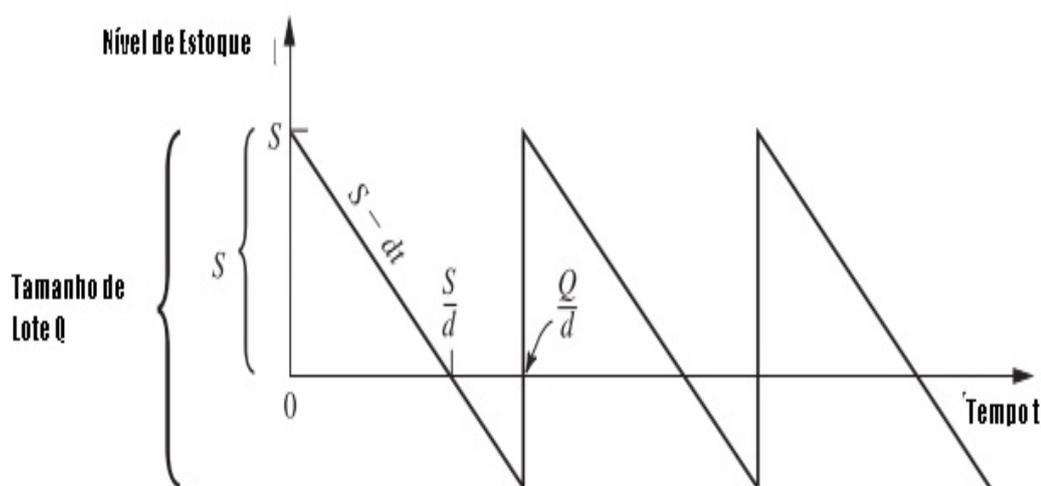
endereça esse tipo de situação trocando a premissa de que não há falta de estoque pela premissa de que agora é possível ocorrer a falta de estoque, e por consequência, atrasos. Quando ocorre uma escassez, os clientes afetados esperarão que o produto fique disponível novamente. Seus pedidos pendentes são atendidos imediatamente quando a quantidade do pedido chega para reabastecer o estoque. Sob essas suposições, o padrão dos níveis de estoque ao longo do tempo tem a aparência mostrada na figura 3, a aparência dos dentes de serra é a mesma da figura 5. No entanto, agora os níveis de estoque se estendem para valores negativos que refletem o número de unidades do produto que estão em espera. Assim:

p = custo de escassez por unidade em falta por unidade de tempo em falta,

S = nível de estoque logo depois de um lote de Q unidades ser adicionado ao estoque,

$Q - S$ = escassez no estoque logo antes de um lote de Q unidades ser adicionado ao estoque;

Figura 5 – Custo total por unidade de tempo com descontos



Fonte: Traduzido de Hillier e Lieberman (2014)

Agora temos que o custo total por unidade de tempo é obtido pela soma dos seguintes componentes:

$$\text{Custo de pedido por ciclo} = K + cQ \tag{16}$$

Durante cada ciclo, o nível de estoque é positivo por um tempo S/D . O nível médio de estoque durante esse tempo é $(S+0)/2 = S/2$ unidades, e o custo correspondente é $hS/2$ por unidade de tempo. Conseqüentemente,

$$\text{Custo de manunteno por ciclo} = \frac{hS}{2} \frac{S}{D} = \frac{hS^2}{2D} \tag{17}$$

Da mesma forma, a escassez ocorre por um tempo $(Q-S)/D$. A quantidade média de faltas durante esse período é $(0+Q-S)/2 = (Q-S)/2$ unidades, e o custo correspondente é $p(Q-S)/2$ por unidade de tempo. Conseqüentemente,

$$\text{Custo de escassez por ciclo} = \frac{p(Q-S)}{2} \frac{(Q-S)}{D} = \frac{p(Q-S)^2}{2D} \quad (18)$$

Portanto, temos que pelas equações 16, 17 e 18, o custo total por ciclo é dado por:

$$\text{Custo total por ciclo} = K + cQ + \frac{hS^2}{2D} + \frac{p(Q-S)^2}{2D}. \quad (19)$$

E o custo total por unidade de tempo é dado por:

$$T = \frac{DK}{Q} + Dc + \frac{hS^2}{2Q} + \frac{p(Q-S)^2}{2Q}. \quad (20)$$

Neste modelo, existem duas variáveis de decisão (S e Q), portanto os valores ótimos (S^* e Q^*) são encontradas definindo as derivadas parciais e igualando a zero. Logo:

$$\frac{\partial T}{\partial S} = \frac{hS}{Q} - \frac{p(Q-S)}{Q} = 0. \quad (21)$$

$$\frac{\partial T}{\partial Q} = -\frac{DK}{Q^2} - \frac{hS^2}{2Q^2} + \frac{p(Q-S)}{Q} - \frac{p(Q-S)^2}{2Q^2} = 0. \quad (22)$$

Resolvendo ambas as equações simultaneamente temos que:

$$S^* = \sqrt{\frac{2DK}{h}} \sqrt{\frac{p}{p+h}}. \quad (23)$$

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DK}{h}} \sqrt{\frac{p+h}{p}}. \quad (24)$$

E a duração ótima do ciclo é dada por t^* :

$$t^* = \frac{Q^*}{D} = \sqrt{\frac{2K}{Dh}} \sqrt{\frac{p+h}{p}}. \quad (25)$$

A escassez máxima é dada por:

$$Q^* - S^* = \sqrt{\frac{2DK}{P}} \sqrt{\frac{h}{p+h}}. \quad (26)$$

Além disso, temos que a fração do tempo em que não existe escassez é dada por:

$$\frac{S^*/D}{Q^*/D} = \frac{p}{p+h}, \quad (27)$$

que é independente de K .

Quando p ou h é muito maior que o outro, as quantidades acima se comportam de maneira intuitiva. Quando $p \rightarrow \infty$ com h constante (ou seja, com os custos de escassez sendo mais relevantes que os custos de manutenção), $Q^* - S^* \rightarrow 0$ enquanto ambos Q^* e t^* convergem para seus valores para o modelo EOQ básico. Ainda que o modelo em questão permita atrasos, $p \rightarrow \infty$ implica que atrasar não vale a pena.

Pelo outro lado, quando $h \rightarrow \infty$ com p constante (ou seja, com os custos de manutenção sendo mais relevantes que os custos de escassez), $S^* \rightarrow 0$. Assim, ter $h \rightarrow \infty$ torna antieconômico ter níveis de estoque positivos, de modo que cada novo lote de unidades Q^* não vai além da remoção da atual falta de estoque.

2.1.4.2.4 Taxa de reposição finita: EPQ

Se houver uma taxa de produção finita, o lote inteiro não será entregue ao mesmo tempo. Ao invés disso, o lote é entregue continuamente com uma certa taxa de produção (AXSATER, 2006). O modelo EPQ é bastante semelhante ao modelo EOQ, mas é aplicado à manufatura. Este modelo é usado quando:

- o estoque aumenta ao longo de um período de tempo após o pedido ser feito;
- as unidades são produzidas e vendidas simultaneamente;

No modelo EOQ, assumimos que o recebimento de estoque é instantâneo e completo. Agora que permitimos o recebimento de estoque ao longo de um período de tempo, temos que p é a taxa de produção ($p > D$).

Em cada ciclo a produção é realizada em um período de Q/p . Durante o tempo Q/p o estoque aumenta em uma taxa $p - D$. Assim o máximo nível de estoque é $(Q/p)(p - D) = Q(1 - D/p)$. Depois do tempo Q/p o estoque diminui com uma taxa D . A diferença entre este modelo e o modelo clássico é a de que o nível médio de estoque agora é $Q(1 - D/p)/2$ ao invés de $Q/2$. Assim, o custo total por unidade de tempo é dado por:

$$T = \frac{DK}{Q} + Dc + \frac{Q(1 - \frac{D}{p})}{2}h \quad (28)$$

Assim, a quantidade ótima é dada por:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DK}{h(1 - \frac{D}{p})}} \quad (29)$$

Fica evidente pela equação 29 que quando $p \rightarrow \infty$ (ou seja, a taxa de produção é infinita) remetemos novamente ao modelo do EOQ clássico.

2.1.4.3 Modelos de estoque para sistemas de único nível com demanda determinística e variável no tempo

Agora que entendemos o que é o modelo EOQ (*economic order quantity*) e algumas de suas variações, é possível relaxar a suposição de que a demanda é constante permitindo com que ela varie com o tempo. Como argumenta Silver, Pyke e Peterson (2016) esse tópico, que é conhecido como dimensionamento de lotes na literatura acadêmica e prática, é de suma importância dada a abrangência de situações práticas em que a demanda média que varia no tempo é utilizada, tais como:

1. Operações de montagem multi-nível em que uma programação firme de produtos acabados explode através dos vários estágios de montagem, levando requisitos de produção e compras para os níveis anteriores da estrutura defasados no tempo (esse tipo de sistemática é conhecida como MRP - *Material Requirements Planning*. Esses requisitos são relativamente determinísticos, mas praticamente sempre variam com o tempo;
2. Produção sob contrato, quando contratos exigem que certas quantidades sejam entregues aos clientes em datas especificadas;
3. Itens com demanda sazonal;
4. Peças de reposição para um item que está sendo retirado de operação. Aqui, a taxa de demanda cai com o tempo;
5. Itens com padrões de demanda conhecidos de um modo geral;
6. Peças para manutenção preventiva onde o cronograma de manutenção é conhecido com previsão.

Quando a taxa de demanda varia com o tempo, não podemos assumir que a melhor estratégia é usar sempre a mesma quantidade de reposição (de fato, raramente será o caso). Agora, o diagrama do nível de estoque não é mais o padrão dente de serra de repetição simples tal qual vimos anteriormente e isso torna ainda mais difícil de se fazer uma análise exata. Agora se faz necessário utilizar informações de demanda por um período finito, estendendo-se do presente, ao determinar o valor apropriado da quantidade de reposição atual, dado que a variação na demanda nos impede de usar custos médios simples em um período de unidade típico, como era possível na derivação do modelo EOQ. (SILVER; PYKE; PETERSON, 2016) Esse período finito é conhecido como horizonte de planejamento e sua duração pode ter um efeito substancial nos custos relevantes totais da estratégia selecionada. Tudo mais constante, é preferível trabalhar com horizontes de planejamento menores dado que quanto mais longe no futuro procurarmos por informações de demanda, menos

precisas elas serão. Na prática, quase sempre o procedimento de cronograma contínuo é usado. Nesse sentido, o dimensionamento de lotes de reabastecimento pode ser feito para todo o horizonte de planejamento; no entanto, apenas a decisão crítica, iminente para o momento é tomada. Por exemplo: se o modelo (que será apresentado à seguir) sugerir que será necessária uma compra na semana atual e outro lote de compra daqui 6 semanas, não faz sentido se comprometer com a compra de 6 semanas hoje. No momento da próxima decisão, novas informações de demandas são anexadas visando manter o tamanho do horizonte de planejamento constante. Quando se trata de um padrão de demanda determinístico e que varia no tempo, existem basicamente três abordagens para tratamento do problema (SILVER; PYKE; PETERSON, 2016):

1. O uso do modelo EOQ básico. Como mencionado anteriormente, uso de uma taxa média de demanda pode ser utilizada sem grandes erros quando a variabilidade do padrão da demanda é relativamente baixa;
2. Uso da melhor solução exata para um modelo matemático particular do caso em questão. Como veremos à seguir, sob um conjunto específico de premissas, o algoritmo de Wagner-Whitin minimiza o custo total.
3. Uso de métodos aproximados ou heurísticos. A ideia principal aqui é utilizar de uma abordagem que lide bem com a complexidade de uma demanda que varia no tempo ao mesmo tempo que consiga ser palatável para que praticantes possam compreendê-la e não consuma muito poder computacional.

Axsater (2006) menciona que ao lidar com dimensionamento de lote para demanda variável com o tempo, geralmente se assume um número finito de etapas ou períodos discretos. Um período pode ser, por exemplo, um dia ou uma semana. Conhecemos a demanda em cada período e, para simplificar, presume-se que a demanda do período ocorre no início do período. Não há estoque inicial. Ao entregar um lote, todo o lote é entregue ao mesmo tempo. O custo de manutenção e o custo do pedido são constantes ao longo do tempo. Não são permitidos pedidos em atraso. Podemos utilizar a seguinte notação:

- T: número de períodos;
- d_i : demanda no período i , com $i = 1, 2, \dots, t$ (é assumido que $d_1 > 0$, caso contrário podemos desconsiderar o período 1);
- K: custos de pedido;
- h: custos de manutenção por unidade por unidade de tempo;

O problema do tamanho de lote dinâmico aqui descrito pode ser resolvido com o uso de Programação Dinâmica, um procedimento matemático para resolver problemas de decisão sequenciais (AXSATER, 2006). Isso foi sugerido pela primeira vez por Wagner e Whitin (1954) e sua solução é geralmente denotada como o algoritmo de Wagner-Whitin. A notação se dá por:

- f_k = custos mínimos dos períodos 1, 2, ..., k, ou seja, quando desconsideramos os pontos $k+1, k+2, \dots, T$,
- $f_{k,t}$ = custos mínimos dos períodos 1, 2, ..., k, dado que a última entrega é no período t ($1 \leq t \leq k$)

Note que:

$$f_k = \min_{1 \leq t \leq k} f_{k,t}, \quad (30)$$

Isso dado que a última entrega deve ocorrer em algum período na solução ótima. Também é óbvio que $f_0 = 0$ e que $f_1 = f_{1,1} = A$. Isso ocorre porque com apenas um período obtemos um custo de setup, mas nenhum custo de manutenção. Lembre-se de que a demanda do período é considerada como ocorrendo no início de um período. Imagine que agora é conhecido f_{t-1} para algum $t > 0$. Assim, é fácil de obter $f_{k,t}$ para $k \geq t$:

$$f_{k,t} = f_{t-1} + A + h(d_{t+1} + 2d_{t+2} + \dots + (k-t)d_k) \quad (31)$$

Como temos uma entrega no período t, os custos mínimos para os períodos 1, 2, ..., t - 1 devem ser f_{t-1} . O custo no período t é o custo de instalação A. Lembre-se novamente de que as demandas são consideradas como ocorrendo no início dos períodos. Isso significa que d_t não causará nenhum custo de manutenção. A demanda no período t + 1 incorre nos custos de manutenção hd_{t+1} uma vez que a quantidade d_{t+1} é mantida em estoque durante o período t. A demanda no período t + 2 é igualmente mantida em estoque durante dois períodos, t e t + 1, e incorre nos custos de manutenção $2hd_{t+2}$, etc.

2.1.4.4 Modelos de estoque para sistemas de único nível com demanda estocástica

Segundo Silver, Pyke e Peterson (2016), o objetivo de todo sistema de controle de estoque é determinar a:

1. frequência de determinação da posição de estoque;
2. quando uma reposição deve ser feita;
3. qual o tamanho dessa reposição;

Essa decisão está atrelada à situação do estoque, à demanda prevista e aos diferentes fatores de custo (AXSATER, 2006). Embora seja natural pensar que a decisão de pedido esteja ligada apenas no estoque disponível, devemos incluir também os recebimentos programados e os pedidos em carteira (ou seja, unidades que foram solicitadas mas ainda não foram entregues). Nesse sentido, a situação de estoque pode ser caracterizada pela posição de estoque:

$$\text{Pos. de Estoque} = \text{Estoque em Maos} + \text{Receb. Programados} - \text{Pedidos em Carteira} \quad (32)$$

Se os clientes podem reservar as unidades para uma entrega no futuro, as unidades reservadas também são subtraídas da posição de estoque. Nesse sentido, unidades reservadas são tratadas da mesma forma que unidades que são encomendadas para entrega imediata, o que é bastante comum e razoável (a menos que esses pedidos estejam em um futuro muito distante, o que acarretaria em custos de manutenção desnecessários). Já o estoque líquido pode ser definido pela seguinte equação (SILVER; PYKE; PETERSON, 2016):

$$\text{Estoque Líquido} = \text{Estoque em Maos} - \text{Pedidos em Carteira} \quad (33)$$

Nas últimas seções dessa revisão de literatura, abordamos alguns modelos utilizados sob suposições de demanda determinística. Nesse sentido, o problema de se estabelecer uma frequência para a determinação da posição do estoque se torna simples dado que ao saber a posição do estoque em qualquer ponto é possível calculá-lo em todos os pontos do tempo (pois a demanda é conhecida). Além disso, sob demanda determinística, o problema de se determinar quando uma reposição deve ser realizada pode ser resolvido colocando um pedido que chegue no momento em que o estoque atinja algum valor prescrito (que usualmente é definido como zero). Já o problema de qual deve ser a quantidade ideal para essa reposição é respondido pelo EOQ e suas variações (para o caso de demanda constante) ou por algum outro procedimento como o algoritmo de Wagner-Within e a heurística de Silver-Meal (para casos em que a demanda varia no tempo) (SILVER; PYKE; PETERSON, 2016). Agora sob a suposição de uma demanda probabilística essas respostas se tornam um pouco mais difíceis de serem obtidas. Em relação ao primeiro problema: estabelecer uma alta frequência para determinação da posição de estoque pode exigir um grande dispêndio recursos como o tempo de um analista de planejamento de materiais e memória computacional; por outro lado, uma baixa frequência para determinação da posição de estoque significa que mais longo é o período durante o qual o sistema deve se proteger contra variações imprevistas na demanda. Já a pergunta de "quando pedir?" consiste basicamente em um trade-off entre o custo de pedir com antecedência (e por consequência, manter estoque extra) e os custos (diretos ou indiretos) de fornecer um nível de serviço abaixo

das expectativas dos clientes. O problema de "quanto comprar?" está ligado à fatores semelhantes aos discutidos na formulação do EOQ básico, com a diferença de que aqui existem alguns critérios de serviços, geralmente especificados pela gerência, que podem influenciar diretamente a pergunta do "quando." Nesse sentido, quatro pontos são de suma importância para o estabelecimento de políticas de estoque pela gerência:

1. Nível de importância do item;

O primeiro passo para a definição das diferentes políticas de reposição de estoque é a segmentação ABC, que é uma boa maneira de definir o nível de importância e segmentar os diferentes materiais. Segundo a classificação contida no dicionário da APICS (*American Production and Inventory Control Society*), a classificação de um grupo de itens em ordem decrescente de volume anual em dólares (preço multiplicado pelo volume projetado) pode ser dividida em três classes: A, B e C.

- A classe A geralmente representa 10-20% pelo número de itens e 50-70% pelo volume projetado anual em dólares;
- A classe B geralmente 20% do número de itens e aproximadamente 20% do volume projetado anual em dólares;
- A classe C contém geralmente 60-70% do número de itens e 10-30% do volume anual em dólares.

O princípio ABC afirma que esforço e dinheiro podem ser economizados aplicando-se controles mais flexíveis aos itens da classe de baixo volume do que aos itens da classe de alto volume. O princípio ABC é aplicável a estoques, compras e vendas. Ao reconhecer isso como o princípio de Pareto, é possível interpretar que 80% dos esforços virão de 20% das causas possíveis. As empresas costumam incluir itens de movimentação lenta e baratos na categoria A se os itens forem essenciais para o negócio. É possível que a inclusão de muitos itens de movimento lento ou baratos na categoria A altere a distribuição típica de 80-20 mas raramente é o caso.

2. Revisão contínua ou periódica;

De acordo com Axsater (2006), um sistema de controle de estoque pode ser projetado para que a posição do estoque seja monitorada continuamente. Assim que a posição do estoque estiver suficientemente baixa, um pedido é acionado. Denotamos este tipo de sistema como sistema de revisão contínua. Nesse sentido, o pedido acionado será entregue após um determinado *lead time* (L), que nada mais é o tempo entre a colocação do pedido e a disponibilidade desse pedido no

estoque. Esse tempo não inclui apenas o tempo de fornecimento um fornecedor (caso se trate de um pedido externo) ou o tempo de produção (caso se trate de um pedido interno); deve incluir também os tempos de preparação, trânsito, inspeção, manuseio, etc. Uma alternativa para a revisão contínua é considerar a posição do estoque apenas em determinados momentos. Em geral, os intervalos entre essas revisões são constantes e falamos em revisões periódicas em que T (período de revisão) é o intervalo de tempo entre as revisões. Nesse sentido, o caso extremo de um sistema de revisão periódica é o sistema de revisão contínua, ou seja, o status do estoque é sempre conhecido.

Silver, Pyke e Peterson (2016) argumentam que na realidade, a vigilância contínua geralmente não é necessária; ao invés disso, cada transação (envio, recebimento, demanda, etc.) aciona uma atualização imediata do status. Conseqüentemente, esse tipo de controle costuma ser chamado de relatório de transações. Com a revisão periódica, como o nome indica, o status do estoque é determinado apenas a cada T unidades de tempo; entre os momentos de revisão, pode haver considerável incerteza quanto ao valor do nível de estoque. Podemos utilizar como exemplo o caso de um motorista que reabastece máquinas de café em uma biblioteca pública uma vez por semana. Mesmo que o estoque acabe entre as visitas, nenhuma ação será tomada. Como outro exemplo, observe que algumas pequenas empresas designam uma pessoa para revisar o estoque e tomar decisões de compra. Freqüentemente, essa pessoa está tão ocupada que pode alocar apenas uma tarde por semana para realizar essas tarefas. Como esses exemplos mostram, restrições físicas ou limites de tempo geralmente determinam o intervalo de revisão.

Comentamos agora sobre as vantagens e desvantagens da revisão contínua e periódica. Os itens podem ser produzidos no mesmo equipamento, adquiridos do mesmo fornecedor ou despachados no mesmo meio de transporte. Em qualquer uma dessas situações, a coordenação das reposições desses diferentes itens pode ser atraente. Nesse caso, a revisão periódica é particularmente atraente porque todos os itens em um grupo coordenado podem receber o mesmo intervalo de revisão (por exemplo, todos os itens comprados de um determinado fornecedor podem ser agendados para revisão toda quinta-feira). A revisão periódica também permite uma previsão razoável do nível de carga de trabalho da equipe envolvida Silver, Pyke e Peterson (2016). Em contraste, sob revisão contínua, uma decisão de reposição pode ser feita em praticamente qualquer momento; portanto, a carga é menos previsível. Um padrão rítmico, em vez de aleatório, costuma ser atraente para a equipe. Outra desvantagem da revisão contínua é que geralmente é mais cara em termos de revisão de custos e revisão de erros. Isso é especialmente verdadeiro para itens de movimento rápido, onde

há muitas transações por unidade de tempo. Hoje, os sistemas de coleta de dados de PDV reduziram drasticamente os custos de revisão e erros. Para itens de movimento extremamente lento, muito poucos custos de revisão são incorridos pela revisão contínua porque as atualizações são feitas apenas quando ocorre uma transação. A principal vantagem da revisão contínua é que, para fornecer o mesmo nível de serviço ao cliente, exige menos estoque de segurança (portanto, menores custos de manutenção) do que a revisão periódica. Isso ocorre porque o período durante o qual a proteção de segurança é necessária é mais longo sob revisão periódica (o nível de estoque tem a oportunidade de cair consideravelmente entre os instantes de revisão, sem que qualquer ação de reposição seja possível nesse ínterim, o que significa dizer o que enquanto nos sistemas de revisão contínua o estoque de segurança deve proteger contra as variações durante o *lead time*, no sistemas de revisão periódica ele deve proteger contra as variações durante o *lead time* (L) + intervalo de revisão(T)). Embora a tecnologia da informação moderna tenha reduzido consideravelmente os custos das inspeções dos níveis de estoque, as revisões periódicas também reduzirão os custos do sistema de controle de estoque. Isso é especialmente verdadeiro para itens com alta demanda. Para itens com baixa demanda, não custa muito mais usar a revisão contínua. As vantagens da revisão contínua também são geralmente maiores para esses itens (AXSATER, 2006). Na prática, portanto, é comum usar revisão contínua para itens com baixa demanda e revisão periódica para itens com maior demanda.

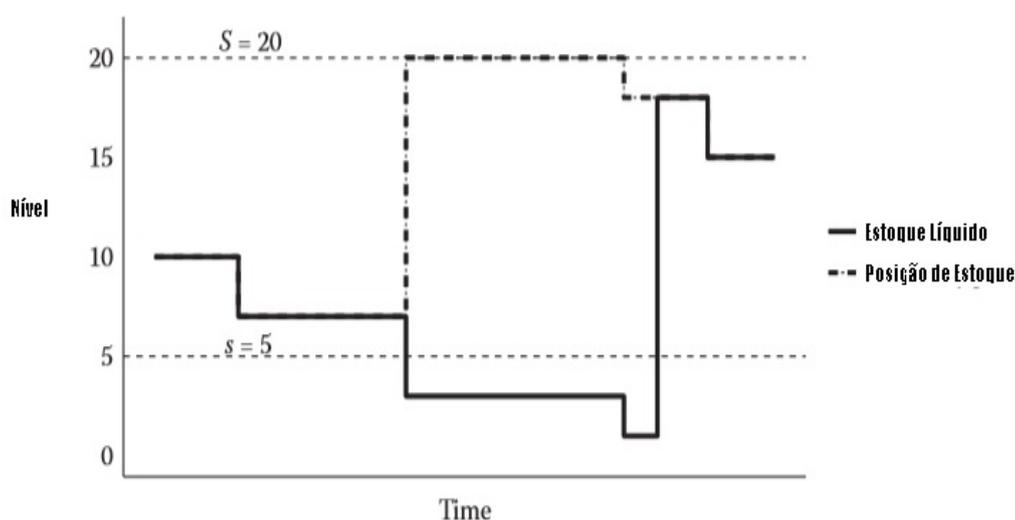
3. Forma da política de estoque;

- Ponto de Pedido, Pedido Fixo - Sistema (R, Q)

O método mais tradicional de implementação de um sistema de estoque de revisão contínua é usar um sistema de duas caixas em que uma quantidade Q fixa é solicitada sempre que a posição do estoque para o ponto de pedido R (HILLIER; LIEBERMAN, 2014). É chamado de sistema de duas caixas por conta de sua forma física de implementação, onde todas as unidades de um determinado produto seriam mantidas em duas caixas com a capacidade de uma caixa sendo igual ao ponto de novo pedido. Quando a primeira caixa é esvaziada e se abre a segunda, uma reposição é acionada. Durante o tempo de espera até o recebimento do pedido, as unidades seriam retiradas desta segunda caixa. Conforme apontam Silver, Pyke e Peterson (2016), é importante salientar que nesse método a posição de estoque (pois esta inclui o estoque sob encomenda ou recebimento programado, materiais solicitados e que ainda não foram recebidos do fornecedor à jusante) é utilizada para acionar um novo pedido e não o estoque líquido, pois o último não considera

também de ponto de pedido ou de ponto de reposição) é chamado de s , e sempre que o estoque cai para esse nível ou menos uma reposição é feita até o nível máximo S . A principal diferença entre esses sistemas é que no sistema (s, S) uma quantidade de reposição variável é utilizada, o que significa que as reposições não são mais múltiplos de um lote fixo, com exceção do caso em que todas transações de demanda são de tamanho unitário. Nesse caso, os dois sistemas são idênticos porque a requisição de reabastecimento sempre será feita quando a posição do estoque estiver exatamente em R ; isto é, $s = R$ e por consequência $S = R + Q$ (AXSATER, 2006). Esse sistema é frequentemente referido como um sistema min-max porque exceto por uma possível queda momentânea abaixo do ponto de reabastecimento, está sempre entre um valor mínimo de s e um valor máximo de S (SILVER; PYKE; PETERSON, 2016).

Segundo Silver, Pyke e Peterson (2016), os custos totais de pedido, manutenção e falta do melhor sistema (s, S) , não são maiores do que os do melhor sistema (R, Q) . Por outro lado, o esforço computacional para encontrar o melhor par (s, S) é substancialmente maior, o que faz com que seja uma melhor escolha apenas para itens A, aqueles cuja economia pontencial é relevante. Para itens B (e até mesmo para a maioria dos itens A), a otimização matemática não faz sentido. A quantidade variável do pedido no sistema (s, S) pode ser considerada uma desvantagem, dado que fornecedores podem cometer erros com maior frequência. A previsibilidade de lotes fixos certamente é mais conveniente, principalmente do ponto de vista operacional (manuseio de caixas, paletes, containers, etc).

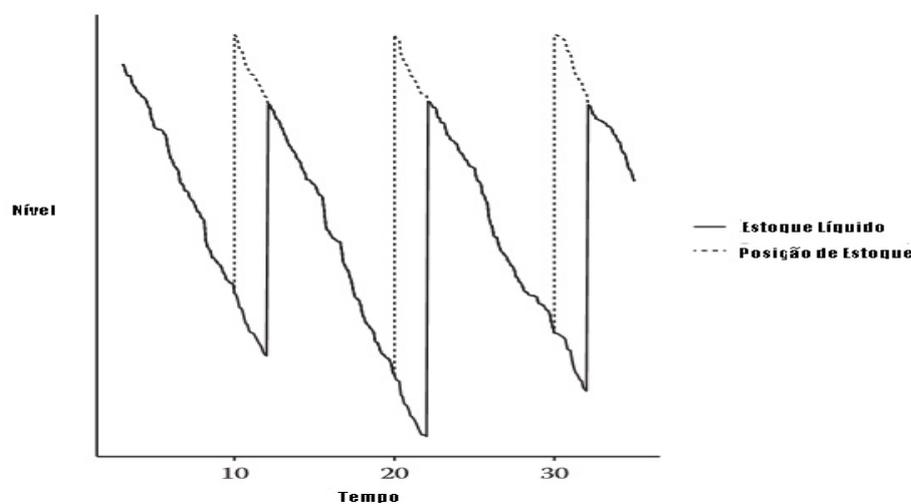
Figura 7 – Sistema (s, S) 

Fonte: Traduzido de Silver et al. (2016)

- Revisão Periódica, Pedido até o nível determinado - Sistema (R, S)

Esse sistema é conhecido como sistema de ciclo de reposição e consiste basicamente em um procedimento em que um pedido é colocado visando atingir uma posição de estoque S à cada R unidades de tempo (SILVER; PYKE; PETERSON, 2016). Por conta da revisão periódica, esse sistema tem vantagens no que tange à coordenação do fornecimento de itens relacionados (por exemplo, vários diferentes SKU's que podem ser pedidos do mesmo fornecedor). Ao invés de serem realizados pedidos dessincronizados (como poderia acontecer em um sistema de revisão contínua), a coordenação atingida por esse sistema possibilitará economias relevantes nos custos de transporte. Além disso, o sistema (R, S) permite o ajuste (a cada R unidades de tempo) do nível de estoque desejado S caso a demanda esteja variando muito com o tempo. As principais desvantagens do sistema (R, S) é que as quantidades de reposição irão variar e os custos de manutenção dos estoques serão maiores que sistemas de revisão contínua.

Figura 8 – Sistema (R, S)



Fonte: Traduzido de Silver et al. (2016)

- Sistema (R, s, S)

Esse sistema é uma combinação de sistemas (s, S) e (R, S). A ideia é que a cada R unidades de tempo a posição de estoque seja verificada. Caso a posição de estoque estiver no ou abaixo do ponto de reposição s, um novo pedido para atingir a posição de estoque S é realizado. Caso contrário, nenhum pedido é feito até o próximo período de revisão. (SILVER; PYKE; PETERSON, 2016). É importante notar que o sistema (s, S) é um caso especial desse sistema quando $R = 0$ e o sistema (R, S) é o caso especial

quando $s = S - 1$. Segundo Clark e Scarf (2004), sob suposições bastante gerais sobre o padrão da demanda e os fatores de custo envolvidos, o melhor sistema (R, s, S) produz um total menor de custos de reposição, transporte e escassez do que qualquer outro sistema. No entanto, o esforço computacional para obter os melhores valores para os três parâmetros de controle do sistema é mais intenso que para os outros sistemas. Nesse sentido, esse sistema é mais válido para itens de classe A. Sistemas (R, s, S) são encontrados na prática quando R é selecionado em grande parte por conveniência (por exemplo, 1 dia), mesmo quando o equipamento POS permite uma revisão contínua da posição do estoque.

2.1.4.5 Modelos de dimensionamento de lotes para sistemas multi-nível/multi-escalão

Até agora, considerou-se uma única instalação. Na prática, porém, também é comum ver sistemas de estoque de vários estágios ou vários níveis, onde várias instalações são acopladas umas às outras. Por exemplo, ao distribuir produtos em grandes áreas geográficas, muitas empresas usam um sistema de estoque com um depósito central próximo às instalações de produção e vários pontos de estoque locais próximos aos clientes em diferentes áreas. Da mesma forma, na produção, os estoques de matérias-primas, componentes e produtos acabados são acoplados uns aos outros. Para obter um controle eficiente de tais sistemas de estoque, é necessário usar métodos especiais que levam em consideração a conexão entre os diferentes estoques (AXSATER, 2006).

Conforme argumentam Hillier e Lieberman (2014), a análise de sistemas de estoque multi-nível é um desafio enorme e uma considerável agenda de pesquisa (com raízes remontando à metade do século 20) vem sendo conduzida para desenvolver modelos de estoque multi-nível tratáveis, cujo objetivo é coordenar os estoques nos vários níveis da cadeia de forma a minimizar o custo total associado ao sistema de estoque como um todo. Este é um objetivo natural para uma corporação totalmente integrada que opera todo esse sistema, mas também pode ser um objetivo adequado quando certos níveis são administrados por fornecedores ou clientes da empresa. A razão é que um conceito-chave do gerenciamento da cadeia de suprimentos é que uma empresa deve se esforçar para desenvolver uma relação de parceria com seus fornecedores e clientes que lhes permita maximizar o lucro total em conjunto com o desenvolvimento de contratos de fornecimento mutuamente benéficos que permitem a redução do custo total de operação de um sistema de estoque de vários níveis gerenciado em conjunto (HILLIER; LIEBERMAN, 2014). A análise de modelos de estoque de múltiplos níveis tende a ser consideravelmente mais complicada do que aqueles para modelos de estoque de instalação única consideradas nas seções anteriores.

O sistema de estoque multi-nível mais simples possível é aquele em que há

apenas dois níveis e apenas uma única instalação em cada nível. Por exemplo, a instalação 1 pode ser uma fábrica produzindo um determinado produto e a instalação 2 pode ser o centro de distribuição desse produto. Como os itens na instalação 1 e na instalação 2 podem ser um pouco diferentes, eles serão chamados de item 1 e itens 2, respectivamente. As unidades do item 1 e do item 2 são definidas de modo que exatamente uma unidade do item 1 seja necessária para obter uma unidade do item 2. O modelo leva em conta às seguintes premissas:

1. As premissas do modelo EOQ básico mantêm-se na instalação 2. Assim, há uma taxa de demanda constante conhecida de D unidades por unidade de tempo, uma quantidade de pedido de unidades Q_2 é colocada a tempo de reabastecer o estoque o nível de estoque cai para zero (atrasos planejados não são permitidos).
2. Os custos relevantes na instalação 2 são o custo de setup K_2 à cada pedido colocado, e o custo de manutenção h_2 por unidade por unidade de tempo.
3. A instalação 1 usa seu estoque para fornecer um lote de Q_2 unidades para a instalação 2 imediatamente cada vez que um pedido é recebido.
4. Um pedido de Q_1 unidades é colocado em tempo de ter o estoque reabastecido na instalação 1 antes de uma falta acontecer.
5. Os custos relevantes na instalação 1 são o custo de setup K_1 à cada pedido colocado e o custo de manutenção h_1 por unidade por unidade de tempo.
6. As unidades aumentam em valor quando elas são recebidas e processadas na instalação 2, logo $h_1 < h_2$.
7. O objetivo é minimizar a soma dos custos variáveis por unidade de tempo nas duas instalações (denotado por C).

Figura 9 – Sistema em Série de Dois Níveis



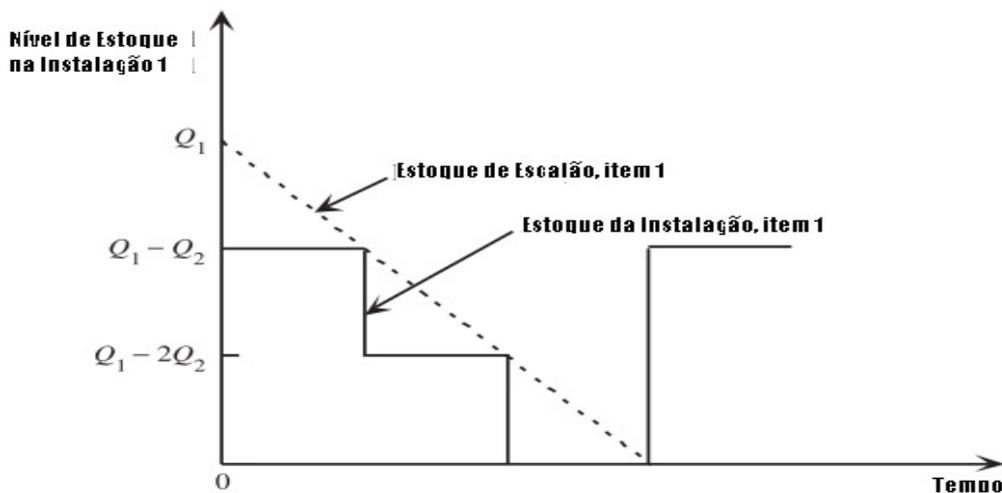
Fonte: Traduzido de Hillier e Lieberman (2014)

A palavra "imediatamente" na premissa 3 significa dizer há um *lead time* de zero unidades de tempo entre o momento em que a instalação 2 faz o pedido e a

instalação atende à esse pedido. Muito embora saibamos que na prática os *lead times* não são zero (sempre há tempos de processamento), esse artifício serve para facilitar a modelagem. *Lead time* de zero dias (colocação e recebimento imediato) é o mesmo que um *lead time* de uma semana com o pedido sendo colocado com antecedência de uma semana. Embora um *lead time* zero e um *lead time* fixo sejam equivalentes para fins de modelagem, estamos assumindo especificamente um *lead time* zero porque simplifica a conceituação de como os níveis de estoque nas duas instalações variam simultaneamente ao longo do tempo. Na instalação 2, são mantidas as mesmas suposições do modelo EOQ Básico, logo os níveis de estoque variam de acordo com o padrão de dente de serra apresentado na seção do EOQ básico. Cada vez que o estoque da instalação 2 chega à zero, a instalação envia Q_2 unidades do item 1 para a instalação 2. É importante lembrar que o item 1 e o item 2 podem ser o mesmo item (caso de uma fábrica que envia o produto final para um centro de distribuição) ou itens diferentes (fornecedor que envia componentes para um fabricante). O estoque na instalação 2 vai sendo consumido à uma taxa de demanda constante (D) até que chegue a zero, quando uma nova reposição é solicitada.

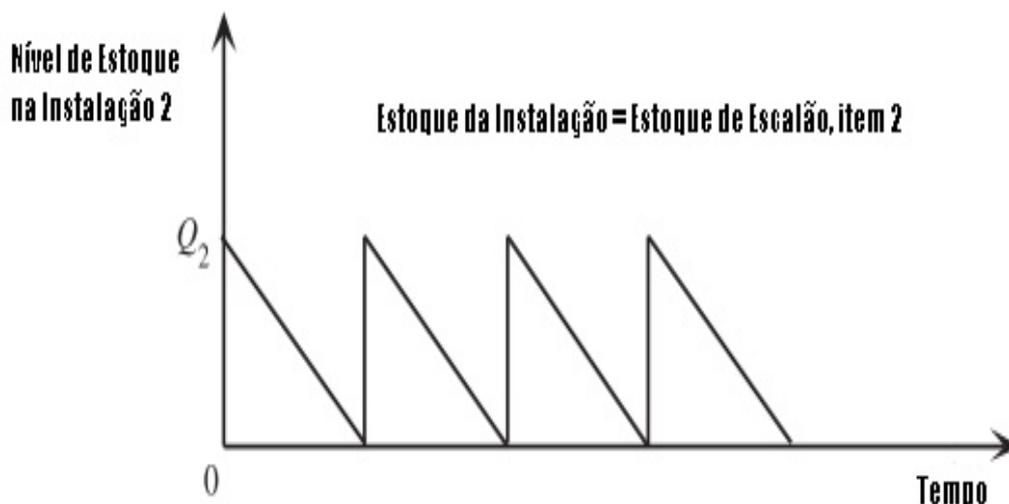
O padrão dos níveis de estoque ao longo do tempo para a instalação 1 é um pouco mais complicado do que para a instalação 2. O fato de que Q_2 unidades precisam ser retiradas do estoque da instalação 1 para fornecer a instalação 2 exige a reposição do estoque da instalação 1 de modo que uma quantidade de pedido de unidades Q_1 é feita periodicamente. A natureza determinística desse modelo implica que a instalação 1 deve reabastecer seu estoque apenas no instante em que seu nível de estoque é zero e é hora fazer uma retirada do estoque a fim de abastecer a instalação 2. Porém, é interessante se perguntar o que aconteceria caso a instalação 1 fosse reabastecer seu estoque antes ou depois desse instante. Se o reabastecimento fosse posterior a este instante, a instalação 1 não poderia fornecer a instalação 2 a tempo de continuar seguindo a política de estoque ideal, então isso é inaceitável pelas próprias premissas do modelo. Se o reabastecimento for anterior a este instante, a instalação 1 incorrerá no custo extra de manter este estoque até o momento de fornecer a instalação 2, portanto, é melhor adiar o reabastecimento na instalação 1 até este momento. Isso leva ao insight de que uma política ótima deve ter $Q_1 = nQ_2$ com n sendo um inteiro positivo. Além disso, a instalação 1 só deve realizar um pedido de Q_1 unidades quando seu estoque for zero e for o momento de abastecer a instalação 2 com Q_2 unidades.

Figura 10 – Nível de Estoque na Instalação 1



Fonte: Traduzido de Hillier e Lieberman (2014)

Figura 11 – Nível de Estoque na Instalação 2



Fonte: Traduzido de Hillier e Lieberman (2014)

Esse é o tipo de política representado nas figuras 10 e 11, que mostra o caso em que $n = 3$. Em particular, cada vez que a instalação 1 recebe um lote de unidades Q_1 , ela fornece simultaneamente a instalação 2 com um lote de unidades Q_2 , de modo que a quantidade de estoque disponível (chamado de estoque de instalação) na instalação 1 torna-se $Q_1 - Q_2$ unidades. Depois de fornecer posteriormente a instalação 2 com mais dois lotes de unidades Q_2 , a Fig. XX mostra que o próximo ciclo começa com a instalação 1 recebendo outro lote de unidades Q_1 ao mesmo tempo em que precisa fornecer a instalação 2 com mais um lote de unidades Q_2 . A abordagem mais fácil e mais comumente usada seria resolver separadamente para os valores de Q_2

e $Q_1 = nQ_2$ que minimizasse o custo variável total por unidade na instalação 2 e na instalação 1, respectivamente. No entanto, essa abordagem peca ao não levar em conta às conexões existentes entre os custos variáveis nas duas instalações, dado que o lote Q_2 para o item 2 afeta o padrão do nível de estoque pro item 1, fazendo com que otimizar Q_2 separadamente (sem levar em conta as implicações para o item 1) não levará uma solução ótima geral.

Sem entrar nos detalhes da derivação algébrica do modelo (que podem ser conferidos em Hillier e Lieberman (2014)), temos que a quantidade Q_2^* é dada por:

$$Q_2^* = \sqrt{\frac{2D(\frac{K_1}{n} + K_2)}{ne_1 + e_2}} \quad (34)$$

Com:

$$e_1 = h_1 = \text{custo de man. do escalao por un. por un. de tempo para a instalacao 1}; \quad (35)$$

$$e_2 = h_2 - h_1 = \text{custo de man. do escalao por un. por un. de tempo para ainstalacao 2}; \quad (36)$$

E o custo total é dado por:

$$C = \sqrt{2D(\frac{K_1}{n} + K_2)(ne_1 + e_2)} \quad (37)$$

E o n^* é dado por:

$$n^* = \sqrt{\frac{K_1e_2}{K_2e_1}} \quad (38)$$

Caso o valor de n^* não seja inteiro, o procedimento para arredondamento é dado por:

- Se $n^* < 1$, escolha $n = 1$.
- Se $n^* > 1$, com $[n^*]$ sendo o maior inteiro $\leq n^*$, tal que $[n^*] \leq n^* < [n^*] + 1$, então arredonde como à seguir:
 - Se $\frac{n^*}{[n^*]} \leq \frac{[n^*]+1}{n^*}$, escolha $n = [n^*]$
 - Se $\frac{n^*}{[n^*]} > \frac{[n^*]+1}{n^*}$, escolha $n = [n^*] + 1$

Aqui foi apresentado o caso simples de um sistema com duas instalações. A mesma lógica, com as mesmas premissas, poderia ser aplicada a um modelo em série com N instalações. No entanto, é surpreendentemente difícil de garantir uma solução ótima para esse modelo quando $N > 2$ (HILLIER; LIEBERMAN, 2014). A experiência

sugere que as políticas de controle ideais para sistemas multi-nível podem ser calculadas apenas em ambientes limitados (TSAY; NAHMIAS; AGRAWAL, 1999). Sabemos que na prática, muitos sistemas de estoque multi-nível são ainda mais complexos que um sistema em série com N instalações. Uma instalação pode ter vários sucessores imediatos, como fábricas que distribuem seus produtos para múltiplos atacadistas, que por sua vez distribuem os produtos para múltiplos varejistas. Esses sistemas são conhecidos como sistemas de distribuição. Uma outra situação comum para sistemas de estoque multi-nível é o caso onde existem vários predecessores imediatos, como uma planta de submontagem que recebe componentes de múltiplos fornecedores. Esses sistemas são conhecidos como sistema de montagem (AXSATER, 2006). Nesse sentido, a grande maioria das cadeias de suprimento consiste em uma mistura emaranhada de sistemas de distribuição e sistemas de montagem, com múltiplos predecessores e sucessores imediatos em cada nível. Uma revisão de literatura detalhada conduzida sob uma perspectiva da pesquisa operacional por Gümüs e Güneri (2007) analisou artigos relacionados à gestão de estoques multi-nível de 1996 à 2005 com a conclusão de que a técnica mais utilizada na pesquisa é a simulação. Além disso, técnicas de modelagem analítica, matemática e estocástica são comumente usadas na literatura. Recentemente, heurísticas como lógica fuzzy e algoritmos genéticos começaram gradativamente a ser utilizadas.

2.2 GESTÃO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS

O leitor pode-se perguntar nesse momento qual é a relação entre a gestão da cadeia de suprimentos e a gestão de estoques. Conforme bem aponta Tsay, Nahmias e Agrawal (1999), uma questão natural a ser abordada primeiro é o que se entende por pesquisa sobre a GCS e como ela se relaciona com o vasto corpo de trabalho que constitui a teoria clássica de estoques. Como já introduzido anteriormente, a modelagem de estoques, por si só, data do início do século e das ideias de um engenheiro da Westinghouse chamado Ford Harris em 1913 através do modelo EOQ clássico. O uso moderno do termo parece ser consistente com as seguintes definição: uma cadeia de suprimentos é formada por duas ou mais partes ligadas por um fluxo de material, informacional e financeiro. Segundo a definição de Simchi-Levi, Kaminsky e Simchi-Levi (1999), a gestão da cadeia de suprimentos é um "conjunto de abordagens utilizadas para integrar com eficiência fornecedores, fabricantes, armazéns, depósitos e lojas, de modo que a mercadoria seja produzida e distribuída nas quantidades certas, nos locais certos e no momento certo, a fim de minimizar os custos do sistema enquanto satisfaz os requisitos de nível de serviço. Por conta disso, parece tentador assumir que a pesquisa da GCS seja essencialmente a mesma que teoria de gerenciamento de estoques multinível, introduzida por Clark e Scarf (2004) para modelar problemas de logística encontrados pelos militares. Usando uma formulação de programação

dinâmica, os autores derivaram a política ótima de pedido e transporte para um sistema serial de produto único que enfrenta demanda independente distribuída de forma idêntica. A política ideal é caracterizada por uma meta de estoque para cada instalação onde o estoque de cada nível conta não apenas o estoque local, mas também o estoque à jusante do sistema. No geral, grande parte do trabalho sobre a teoria de estoques de múltiplos níveis se baseia em suposições relaxadas da formulação básica de Clark-Scarf.

Enquanto a estrutura básica dos sistemas estudados por ambas as literaturas sejam bastante similares, a pesquisa em GCS incorpora um escopo muito maior de problemas que a teoria de estoques multi-nível (TSAY; NAHMIAS; AGRAWAL, 1999). Enquanto a teoria de estoques multi-nível aborda principalmente ao controle da frequência e tamanho dos fluxos de materiais, o gerenciamento da cadeia de suprimentos estuda isso e ainda mais. A GCS trata de ambientes com vários tomadores de decisões, que podem ser firmas diferentes ou departamentos diferentes dentro de uma única empresa. Esses tomadores de decisão podem desenvolver comportamentos que podem ser entendidos como racionais quando olhados sob uma perspectiva local, mas ineficientes se olhados sob uma perspectiva global (TSAY; NAHMIAS; AGRAWAL, 1999). Além disso, o objetivo da gestão da cadeia de suprimentos é ser eficiente de maneira sistêmica. Custos sistêmicos totais, sejam eles de distribuição, transporte, estoques de matérias-primas, trabalho em processo ou bens acabados devem ser minimizados. Por fim, a gestão da cadeia de suprimentos atua em diferentes níveis e tipos de atividades das empresas, do estratégico ao operacional, ao permitir uma integração de fornecedores, fabricantes, armazéns e lojas de maneira eficiente. (SIMCHI-LEVI; KAMINSKY; SIMCHI-LEVI, 1999). Nesse sentido, a atenção e esforços se voltam em encontrar métodos que melhorem a eficiência do sistema.

Pesquisadores e profissionais praticantes da área vêm introduzindo novas abordagens, ferramentas e métodos que poderiam ser considerados impossíveis há décadas atrás, principalmente por conta dos grandes avanços da tecnologia da informação e do poder computacional. O que era outrora uma função puramente operacional de logística, que prestava contas à vendas ou produção e cujo foco era assegurar o abastecimento das linhas de produção e a entrega para clientes, tornou-se agora uma função de gestão independente, que em algumas empresas já é liderada por um CSO – *chief supply-chain officer* ou diretor da cadeia de suprimentos. O foco da gestão da cadeia de suprimentos mudou, e hoje essa função se concentra nos processos avançados de planejamento, como o planejamento analítico da demanda ou o planejamento integrado de vendas e operações (S&OP), que se tornaram processos de negócios estabelecidos em muitas empresas, enquanto a logística operacional é muitas vezes terceirizada para provedores externos de logística. A gestão da cadeia de suprimentos garante que as operações sejam bem integradas, dos fornecedores aos clientes, e que

as decisões sobre custo, estoque e atendimento ao cliente sejam tomadas de uma perspectiva de ponta a ponta, e não isoladamente por função. Silver, Pyke e Peterson (2016) apontam que existem 10 alavancas gerenciais que permitem que uma empresa atinja seus objetivos operacionais (instalações físicas, capacidade, integração vertical, gestão da qualidade, gestão da cadeia de suprimentos, novos produtos, processos e tecnologia, recursos humanos, gestão de estoques, planejamento e controle da produção). Muitas dessas novas abordagens se enquadram na área agora amplamente conhecida como gestão da cadeia de suprimentos. A alavanca da cadeia de suprimentos, é claro, pertence ao gestão da cadeia de suprimentos, mas também o fazem a gestão de estoques, planejamento e programação da produção, integração vertical e novos produtos. Nesse sentido, o gerenciamento da cadeia de suprimentos representa uma mudança fundamental no pensamento clássico do planejamento e controle de produção e na gestão de estoques. A medida que uma abordagem mais integrada para as operações da empresa, ferramentas razoavelmente simples de controle do estoque passaram a ser substituídas para uma integração através de funções inseridas nos sistemas ERP. No entanto, essa evolução foca principalmente nas melhorias (e integração adicional) dentro da firma. A gestão da cadeia de suprimentos tem como foco melhorias em duas ou mais unidades como em uma relação entre duas ou mais firmas (WILLIAM; WHYBARK; VOLLMANN, 2007).

2.2.1 Efeito Chicote e Mecanismos de Coordenação

Ainda que seja difícil definir coordenação precisamente, sua definição mais comumente aceita na literatura é "o ato de gerenciar dependências entre entidades e o esforço conjunto de entidades trabalhando juntas em direção a objetivos mutuamente definidos"(MALONE; CROWSTON, 1994).

A coordenação da cadeia de suprimentos melhora se todos os estágios da cadeia realizam ações alinhadas que aumentam o valor total da cadeia de suprimentos. Uma cadeia de suprimentos coordenada demanda que os membros compartilhem informações e levem em conta os impactos de suas ações nas outras etapas (CHOPRA; MEINDL, PETER, 2012). Os autores apontam que a falta de coordenação nas cadeias de suprimento geralmente pode ser atribuída à dois fatores principais, que são os objetivos conflitantes entre os membros (geralmente ligados ao fato de que cada estágio tenta maximizar seus próprios lucros, resultando em ações que muitas vezes diminuem os lucros totais da cadeia) ou o efeito chicote (que consiste na informação que se move atrasada e distorcida entre os diferentes estágios da cadeia).

O efeito chicote surge com uma informação distorcida que se move ao longo da cadeia; a informação completa é raramente compartilhada entre os diferentes estágios (CHOPRA; MEINDL, PETER, 2012). Além disso, existe uma grande complexidade gerencial e operacional em coordenar as informações referente a uma cada vez mais

crescente variedade de produtos com inúmeros fornecedores e clientes pelo mundo. Nesse sentido, o efeito chicote consiste num aumento da variabilidade nos pedidos quanto mais se move à montante (de varejistas para distribuidores; de distribuidores para produtores; de produtores para fornecedores de matéria-prima, etc) na cadeia de suprimentos. Obviamente a variabilidade é um fenômeno indesejável para operações que visem ser eficientes e por conta disso o efeito chicote deve ser evitado ao máximo. O fenômeno foi observado pela Procter Gamble (P&G) em sua cadeia de suprimentos de fraldas, em que mesmo sabendo que a demanda por fraldas (o consumo por bebês) fosse relativamente estável à jusante (nas lojas e varejistas), os pedidos para os fornecedores de matérias-primas vinha apresentando uma alta variabilidade (LEE; PADMANABHAN; WHANG, 2004)

De fato, o efeito chicote degrada substancialmente o efeito de uma cadeia de suprimentos, dado que o aumento da volatilidade em qualquer ponto da cadeia tende a gerar fenômenos indesejáveis como a escassez de produtos, excesso de estoques, baixa utilização de capacidade e/ou má qualidade. Além disso, o efeito chicote impacta diretamente os estágios à montante da cadeia, que acabam por ter que enfrentar diretamente o impacto da demanda variável, e os estágios à jusante da cadeia, que devem lidar com reposições menos confiáveis dos estágios à montante. Por conta disso, é extremamente necessário que as causas do efeito chicote sejam identificadas para que medidas de mitigação possam ser desenvolvidas (CACHON; TERWIESCH, 2012). Através de um experimento, Cachon e Terwiesch (2012) argumentam que o efeito chicote não precisa ocorrer na prática: quando os membros no mesmo nível implementa políticas de estoque puxadas pela demanda o efeito tende a ser minimizado. No entanto, raramente as empresas adotam políticas de gerenciamento de estoque "livre distorção", eventualmente com boas razões individuais para o desvio desse comportamento. Esses desvios acabam por causar o efeito chicote. Cinco dos principais desvios são:

1. Sincronização de Pedidos

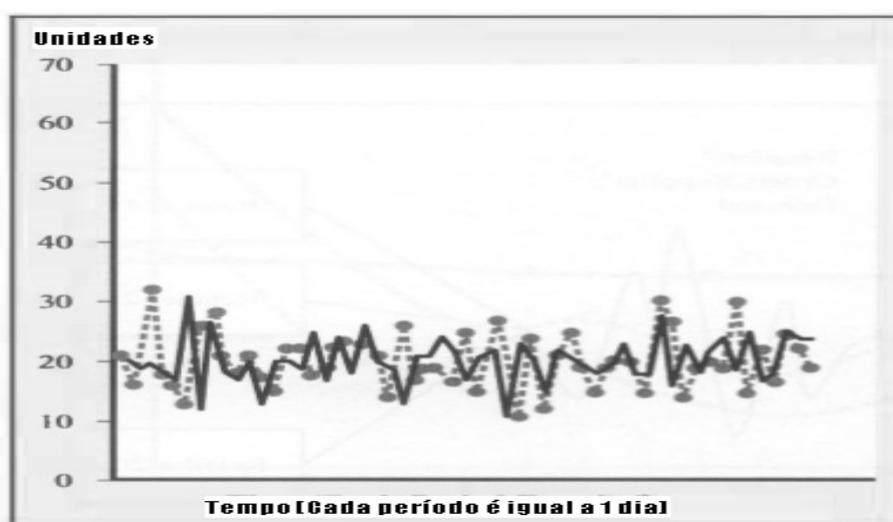
Tomemos como exemplo uma cadeia de suprimentos que consiste em 20 varejistas e um fornecedor. Suponha que os varejistas usem uma política de pedido até um nível determinado (s, S), com pedidos sendo realizados apenas uma vez por semana. Eles podem optar por fazer o pedido semanalmente em vez de diariamente, porque incorrem em um custo fixo por pedido e, portanto, desejam reduzir o número de pedidos que fazem. Como estamos interessados na demanda diária do fornecedor (e não semanal), faz-se importante entender que dia da semana cada varejista emitirá seus pedidos. Cachon e Terwiesch (2012) simularam um primeiro cenário em que os pedidos dos varejistas são igualmente espaçados durante a semana (4 varejistas pedem na segunda, 4 na terça, 4 na quarta, e assim por diante). Simulando por vários períodos, foi possível perceber que dentro des-

nas circunstâncias, o desvio padrão da demanda do consumidor é exatamente igual ao desvio padrão da demanda do fornecedor (em outras palavras: não há efeito chicote).

No entanto, a premissa crítica de que os pedidos dos varejistas seriam igualmente espaçados durante a semana não parece ser muito realista. Simulando um cenário onde os 9 varejistas pediam às segundas, 5 às terças, 1 às quartas, 2 às quintas e 3 às sextas o coeficiente de variação dos pedidos para o fornecedor era praticamente 5 vezes maior que o coeficiente de variação na demanda dos clientes (0,78 contra 0,19). Isso não se deve à nenhuma mudança repentina no padrão da demanda (de fato, a demanda utilizada nas duas simulações era exatamente a mesma).

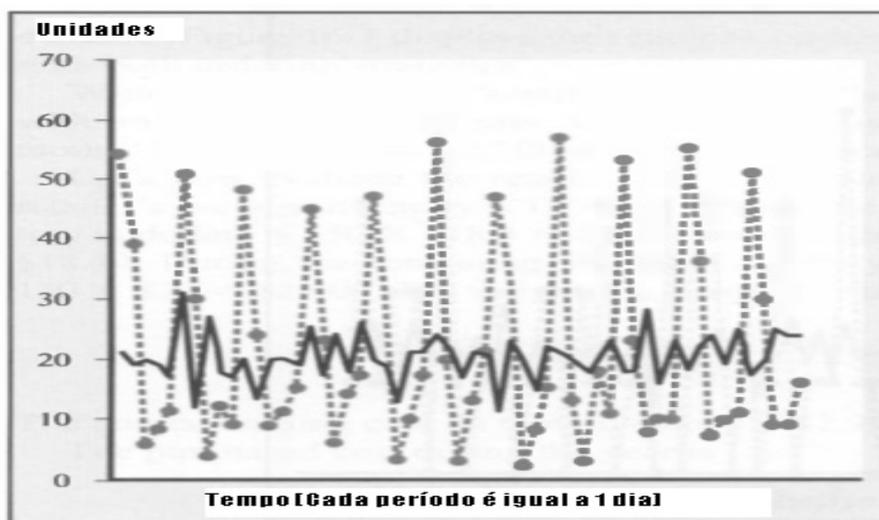
Não apenas observamos o efeito chicote, mas acabamos de identificar uma de suas causas, a sincronização de pedidos: se os ciclos de pedidos dos varejistas ficarem um pouco sincronizados (se agrupando em volta de um mesmo período de tempo) o efeito chicote emerge. Enquanto os varejistas pedem em média para atender à demanda média do consumidor, devido à sincronização de pedidos, haverá períodos em que eles pedem consideravelmente mais do que a média e períodos em que eles pedem consideravelmente menos do que a média, impondo assim uma volatilidade adicional de demanda ao fornecedor (CACHON; TERWIESCH, 2012).

Figura 12 – Demanda diária simulada do consumidor (linha sólida) e demanda diária do fornecedor (círculos). A demanda do fornecedor é igual à soma dos pedidos dos varejistas



Fonte: Traduzido de Cachon e Terwiesch (2012)

Figura 13 – Demanda diária simulada do consumidor (linha sólida) e demanda do fornecedor (círculos) quando os varejistas fazem pedidos semanais. Nove varejistas fazem pedidos na segunda-feira, cinco na terça, um na quarta, dois na quinta e três na sexta



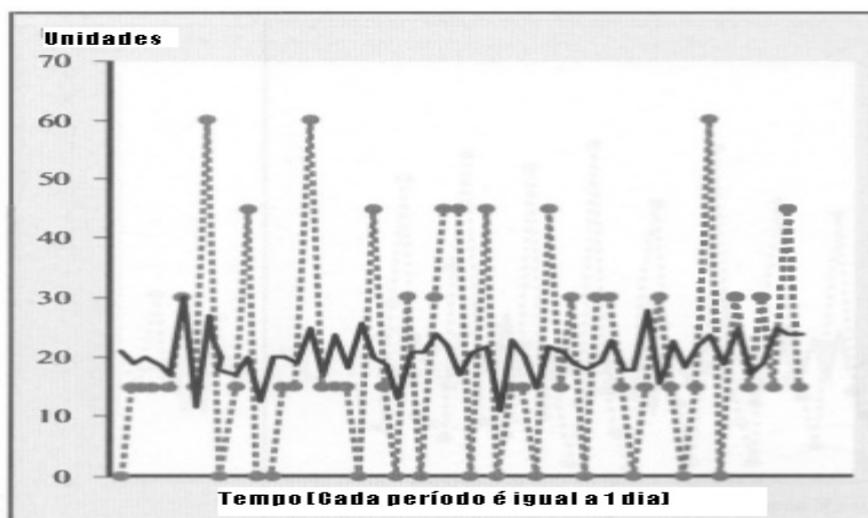
Fonte: Traduzido de Cachon e Terwiesch (2012)

2. Pedidos em Lotes

É bastante comum que as firmas utilizem de lotes visando diminuir os custos com pedidos, além de permitir uma maior facilidade na movimentação, inspeção, carregamento e descarregamento dos material. Nesse sentido, uma regra comum para os pedidos é pedir um novo lote sempre que a demanda acumulada desde o último pedido superar o tamanho do lote. Cachon e Terwiesch (2012) simularam para um lote de 15 unidades paletizado. Toda décima quinta demanda pelo material irá disparar a compra por um palete. Como os varejistas só pedem em quantidades de paletes, a demanda do fornecedor é um múltiplo de 15: em alguns dias não há pedidos, na maioria dos dias um palete é pedido por algum varejista, em alguns dias são encomendados até quatro paletes.

Aqui temos a segunda grande razão para o efeito chicote: pedidos em lotes. Novamente, o pedido total dos varejistas em média é igual à demanda média do consumidor, mas não a variabilidade de seus pedidos. Isso ocorre porque, devido à necessidade de quantidade do lote, a quantidade do pedido do varejista em um período geralmente não corresponde à demanda do varejista naquele período: ela tende a ser maior ou menor que a demanda do consumidor. Em outras palavras, a necessidade de quantidade do lote força o varejista a fazer o pedido de uma forma que é mais variável do que a demanda do consumidor, embora, em média, seja igual à demanda do consumidor.

Figura 14 – Demanda diária simulada do consumidor (linha sólida) e demanda do fornecedor (círculos) quando os varejistas fazem pedidos em lotes de 15 unidades



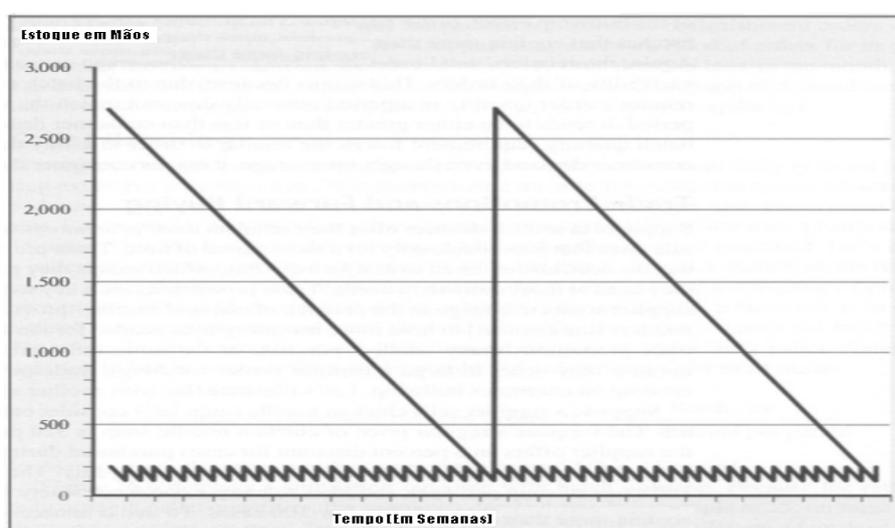
Fonte: Traduzido de Cachon e Terwiesch (2012)

3. Promoções e Compras Antecipadas

Em algumas indústrias, fornecedores tendem à oferecer aos varejistas promoções em que descontos são aplicados em um pequeno período de tempo. Isso faz com que os varejistas comprem antecipadamente, trazendo para seus estoques uma quantidade bastante além de suas necessidades de curto prazo, uma prática que pode ser traduzida como acúmulo de canal e cuja as promoções funcionam como um incentivo. Dado que com as promoções comerciais muitos varejistas compram ao mesmo tempo (sincronização de pedidos) e porque eles fazem pedidos em grandes quantidades (pedidos em lotes), as promoções comerciais são capazes de criar um chicote enorme (CACHON; TERWIESCH, 2012). Utilizando um exemplo comparando duas estratégias de reposição (compras puxadas conforme demanda e compras antecipadas), os autores mostram que caso um fornecedor de sopa oferecesse descontos para compras apenas em duas das 52 semanas do ano (uma no início do verão e em uma no início do inverno), os varejistas tenderiam a antecipar suas compras para essas duas semanas ainda que a demanda dos consumidores continue com o mesmo padrão. Isso significa dizer que os consumidores são muito menos sensíveis ao preço que os varejistas (nenhum consumidor irá comprar 6 meses de sopa por conta de um desconto de, digamos, 8%; mas com certeza isso tem grande impacto na margem do varejo). A sincronização de vários pedidos ao mesmo tempo em lotes grandes pelos diversos varejistas acarretaria em um enorme chicote para o fornecedor. Curiosamente, com a estratégia de compras antecipadas, o varejista nunca compra

pelo preço normal. Portanto, se o fornecedor oferecesse ao varejista o preço com desconto ao longo do ano (em vez de apenas durante as duas semanas de promoção comercial), a receita do fornecedor seria a mesma. No entanto, o varejista poderia então fazer pedidos semanais, reduzindo seus custos de manutenção de estoques. Dado que no cenário com compras antecipadas o varejista deve manter estoque por períodos longos, seus custos de manutenção acabam por aumentar, fazendo com que os custos da cadeia sejam superiores aos de em um cenário com compras puxadas sob demanda, com o mesmo desconto aplicado durante todo ano inteiro.

Figura 15 – Comportamento dos Estoques sob 2 estratégias de compras diferentes



Fonte: Traduzido de Cachon e Terwiesch (2008)

4. Pedidos Reativos

Imagine um varejista que enfrenta uma demanda acima do usual em um determinado período. A reação do varejista a essa situação depende de como ele entende esse fenômeno: se trata de uma flutuação aleatória? Caso se trate, não seria sensato alterar as expectativas em relação a demanda futura. Mas caso esse *outlier* seja uma sinalização de que a demanda mudou (sugerindo que a demanda real do produto é maior do que se esperava anteriormente), o varejista deve aumentar a quantidade do pedido para cobrir a demanda futura adicional, caso contrário irá sofrer com falta de material rapidamente. Nesse sentido, é racional para o varejista aumentar a quantidade do pedido quando confrontado com uma observação de demanda excepcionalmente alta. O mesmo vale para o caso em que a demanda seja abaixo do esperado. Nesse sentido, reações agressivas por parte dos varejistas tendem a intensificar o efeito chicote. Imagine um varejista que aumente, por segurança, suas compras em 50% por conta de

um aumento de 30% na demanda. Caso o fornecedor desse varejista utilize da mesma lógica para seu fornecedor e assim sucessivamente, esse efeito tenderá a se propagar de uma maneira extremamente agressiva ao longo de toda a cadeia, criando instabilidade e o chicote.

5. Disputa por Capacidade

Vamos tomar como exemplo uma série de varejistas que realizam pedidos para um fabricante. Se por algum motivo (que não necessariamente seja racional) os varejistas passem a acreditar que o fornecedor pode passar a não mais atender às suas demandas por falta de capacidade, existirá uma tentação para que esses varejistas inflem seus pedidos visando se proteger de uma eventual escassez de capacidade. A disputa por capacidade pode resultar em uma grande confusão para a cadeia de suprimentos. Alguns varejistas podem receber muito menos do que poderiam vender porque não inflaram seus pedidos o suficiente, enquanto outros podem realmente receber muito mais do que podem vender porque inflaram demais seus pedidos (CACHON; TERWIESCH, 2012).

Nesse sentido, a inflação de pedidos contribui para o efeito chicote: uma vez que os clientes de um fornecedor acreditam que a capacidade pode ser restrita, eles podem aumentar seus pedidos substancialmente, criando assim uma volatilidade excessiva na demanda do fornecedor. Curiosamente, isso pode ocorrer mesmo se houver capacidade suficiente para satisfazer a quantidade desejada dos varejistas; tudo o que é necessário para criar inflação de pedidos é a crença entre os varejistas de que eles podem não receber seus pedidos completos (CACHON; TERWIESCH, 2012).

Se o fabricante estiver usando pedidos para prever a demanda futura, ele interpretará o aumento nos pedidos como um aumento na demanda, mesmo que a demanda do cliente permaneça inalterada. O fabricante pode responder criando capacidade suficiente para atender a todos os pedidos recebidos. Assim que houver capacidade suficiente disponível, os pedidos voltam ao nível normal porque foram inflados em resposta ao esquema de racionamento. O fabricante agora fica com um excedente de produto e capacidade. Esses ciclos de expansão e queda tendem, portanto, a se alternar. Este fenômeno é bastante comum na indústria de eletrônicos, na qual períodos alternados de escassez de componentes seguidos por um excedente de componentes são freqüentemente observados (CHOPRA; MEINDL, PETER, 2012).

Agora que entendemos as principais causas e obstáculos do efeito chicote, fica um pouco mais claro o entendimento de quais são os principais efeitos da falta de coordenação no desempenho da cadeia de suprimentos. Custos de manufatura

podem aumentar substancialmente com a construção de excesso de capacidade, assim como os custos de manutenção de estoques dado que o efeito chicote tende a causar excessos de estoque. Além disso, os *lead times* de reposição tendem a aumentar substancialmente dado que haverão momentos em que a capacidade e estoques disponíveis não são suficientes para atender ao montante de pedidos. Os custos de transporte por sua vez tendem a ser prejudicados pois os mesmos estão diretamente correlacionados às flutuações nos pedidos (CHOPRA; MEINDL, PETER, 2012). Por fim, os custos com mão-de-obra em todos os elos também tendem a aumentar, seja com contratação adicional de funcionários nas fábricas para atender os picos de demanda, seja com o excesso de pessoal para processamento dos envios e recebimentos de pedidos nos demais membros da cadeia. A falta de coordenação tem um efeito negativo no desempenho em todas as fases e, portanto, prejudica as relações entre os diferentes elos da cadeia. Há uma tendência de atribuir culpas a outros estágios da cadeia de suprimentos porque cada estágio pensa que está fazendo o melhor que pode. A falta de coordenação, portanto, leva a uma perda de confiança entre os diferentes estágios da cadeia de abastecimento e torna mais difíceis quaisquer esforços potenciais de coordenação (CHOPRA; MEINDL, PETER, 2012).

Fica agora a pergunta: como lidar com esse fenômeno, que parece inerente à natureza da tomada de decisão dos agentes da cadeia? Quais boas práticas as firmas podem tomar para mitigar os impactos do efeito chicote? Na indústria de alimentos dos Estados Unidos, muitas dessas mudanças vieram com a iniciativa *EffiCient Consumer Response*, que foi iniciada no início dos anos 1990. A alegação era que este conjunto de práticas de negócios, se totalmente implementado, poderia reduzir os custos da indústria de alimentos dos EUA em US\$30 bilhões (CACHON; TERWIESCH, 2012). Algumas das principais práticas para minimizar o efeito chicote são:

1. Compartilhamento de Informação

Maior compartilhamento de informações sobre a demanda real entre os estágios da cadeia de suprimentos é uma etapa intuitiva para reduzir o efeito chicote. Ao permitir que o fornecedor tenha acesso frequente aos dados reais de demanda do consumidor final (e não a apenas aos dados dos pedidos que o varejista envia) permitirá com que ele faça uma melhor avaliação das tendências na demanda e se planeje de acordo (CACHON; TERWIESCH, 2012). Apenas disponibilizar os dados pode não ser suficiente. O varejista pode ter observado grande demanda no mês de janeiro porque fez uma promoção. Se nenhuma promoção for planejada para o próximo janeiro, a previsão do varejista será diferente da previsão do fabricante, mesmo se ambos tiverem acesso aos dados dos PDV anteriores. Nesse sentido, o fabricante deve estar ciente dos planos de promoção do varejista para alcançar a coordenação. É preciso entender quais são as possíveis estratégias promocionais e mercadológicas que esses varejistas podem

estar utilizando para influenciar a demanda do consumidor final, bem como entender qual é o tratamento dado pelos varejistas pelos diferentes produtos. Sem essa informação, o fornecedor pode não construir capacidade suficiente para um produto que os varejistas desejam, ou o fornecedor pode construir capacidade demais de um produto que gera pouco interesse entre os varejistas. Ambos os erros podem ser evitados se o fornecedor e os varejistas compartilharem suas intenções. Este processo de compartilhamento é frequentemente denominado de CPFR, sigla para *Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment*, que significa planejamento, previsão e reposição colaborativos (CHOPRA; MEINDL, PETER, 2012).

2. Suavização do Fluxo de Produtos e Redução de Lotes

Os gerentes podem reduzir a distorção das informações implementando melhorias operacionais que reduzem o tamanho dos lotes. A redução do tamanho dos lotes diminui a quantidade de flutuação que pode se acumular entre qualquer par de estágios de uma cadeia de suprimentos, diminuindo assim a distorção. No entanto, reduzir os lotes de pedido significa reabastecimentos menores e mais frequentes, o que conflita com o objetivo de controlar os custos de pedido, transporte e manuseio. Para reduzir o tamanho dos lotes, os gerentes devem tomar medidas que ajudem a reduzir os custos fixos associados ao pedido, transporte e recebimento de cada lote (CACHON; TERWIESCH, 2012). O custo fixo associado a cada pedido submetido ao fornecedor pode ser reduzido com o uso de sistemas de reposição automática informatizados para decidir quando e quanto pedir. Além disso, algum tipo de padrão de tecnologia, como intercâmbio eletrônico de dados (EDI), pode vir a ser necessário para que os pedidos possam ser transmitidos em um formato eletrônico que possa ser recebido pelo fornecedor. Já a grande diferença existente entre os custos de frete de caminhão cheio e caminhão parcialmente cheio são o maior impedimento para lotes menores na grande maioria das cadeias de suprimento. Uma alternativa para conseguir se obter a redução de lotes sem aumentar os custos de transporte é preencher um caminhão de lotes menores de diferentes produtos (CHOPRA; MEINDL, PETER, 2012). Outra alternativa para reduzir os tamanhos de lote é através de milk-runs, que consistem em combinar entregas de diferentes varejistas em um só caminhão. Em muitos casos, transportadores terceirizados combinam remessas para lojas de varejo concorrentes em um único caminhão, o que ajuda a reduzir o custo fixo de transporte por varejista e permite que cada varejista faça pedidos em lotes menores.

3. Eliminar Incentivos Prejudiciais

Através do racionamento baseado em vendas passadas os gerentes podem criar mecanismos que desencorajem os varejistas de inflar artificialmente seus pedidos em caso de escassez de capacidade (CHOPRA; MEINDL, PETER, 2012). Uma abordagem bastante utilizada na indústria automobilística, conhecida como *turn-and-earn*, faz com que a capacidade seja alocada de maneira proporcional às vendas passadas dos varejistas ao invés das vendas atuais (CHOPRA; MEINDL, PETER, 2012), minimizando as disputas por capacidade. Além disso, a adoção da abordagem do *turn-and-earn* atinge outros objetivos: garante que toda a capacidade do fornecedor seja alocada; aloca mais capacidade para os varejistas que mais vendem, o que faz sentido intuitivamente; além de motivar os varejistas a vender mais do produto do fornecedor (CACHON; TERWIESCH, 2012).

Fornecedores costumam utilizar de temporadas de promoções com o objetivo de aumentar a demanda final dos consumidores. Ao vender com descontos promocionais para os varejistas, os fornecedores esperam que esses descontos sejam em parte repassados para os consumidores finais, incentivando um aumento na demanda, o que de fato costuma acontecer. Como vimos anteriormente, isso tende à gerar um efeito chicote relevante e por conta disso manter um preço de atacado constante (preço baixo todo dia) é a estratégia correta quando se deseja evitar o efeito chicote (CACHON; TERWIESCH, 2012). Os gerentes podem colocar um limite vinculado ao histórico de venda de cada varejista na quantidade que pode ser comprada durante uma promoção, visando diminuir as compras antecipadas. Outra abordagem é vincular os dólares da promoção pagos ao varejista ao valor da venda por distribuidores, e não ao valor comprado pelo varejista. Como resultado, os varejistas não obtêm nenhum benefício com a compra futura e compram mais somente se puderem vender mais. As promoções baseadas na venda por distribuidores reduzem significativamente a distorção das informações (CHOPRA; MEINDL, PETER, 2012).

4. Redução dos *Lead Times* de Reposição

Ao reduzir o **lead time** de reposição, os gerentes podem diminuir a incerteza da demanda durante o **lead time**, afinal, se os prazos de entrega forem curtos o suficiente, o reabastecimento pode ser programado para o consumo real, eliminando assim a necessidade de uma previsão. Uma série de ações em diferentes estágios da cadeia de suprimentos podem ser utilizadas visando reduzir os tempos de reposição: nas fábricas, o aumento da flexibilidade e a manufatura em células podem ser utilizados para se obter uma redução significativa nos prazos de entrega; a utilização do intercâmbio eletrônico de dados (EDI) pode reduzir significativamente o tempo de espera relacionado à colocação de pedidos e trans-

ferência de informações. O compartilhamento dos planos de longo prazo com os fornecedores permite com que a programação da produção possa ser feita com antecedência, deixando a quantidade exata para ser determinada apenas quando mais próximo da produção real. Já o *cross-docking* pode ser utilizado para reduzir os **lead times** associados à movimentação dos materiais entre os elos da cadeia de suprimentos (CHOPRA; MEINDL, PETER, 2012).

5. Alinhamento de Objetivos e Incentivos

A coordenação requer que cada estágio da cadeia de suprimentos se concentre no valor agregado para a cadeia e não apenas em sua parcela individual e por conta disso mecanismos que permitam a criação de um cenário de ganha-ganha, em que o valor gerado para a cadeia cresce à cada etapa fazem-se necessários (CHOPRA; MEINDL, PETER, 2012). Um exemplo desse mecanismo ocorre quando o Walmart paga a HP pelas impressoras vendidas, enquanto a HP toma as decisões de reposição. Alinhar incentivos entre funções, fazendo com que as decisões de capacidade, transporte e estoque sejam avaliadas com base em seus efeitos nos custos totais também é importante para mitigar o efeito chicote. Bons mecanismos de precificação tendem a contribuir de maneira substancial para a coordenação das cadeias de suprimentos. Descontos por lotes maiores oferecidos por fabricantes que incorrem em altos custos fixos é um exemplo desse tipo de estratégia.

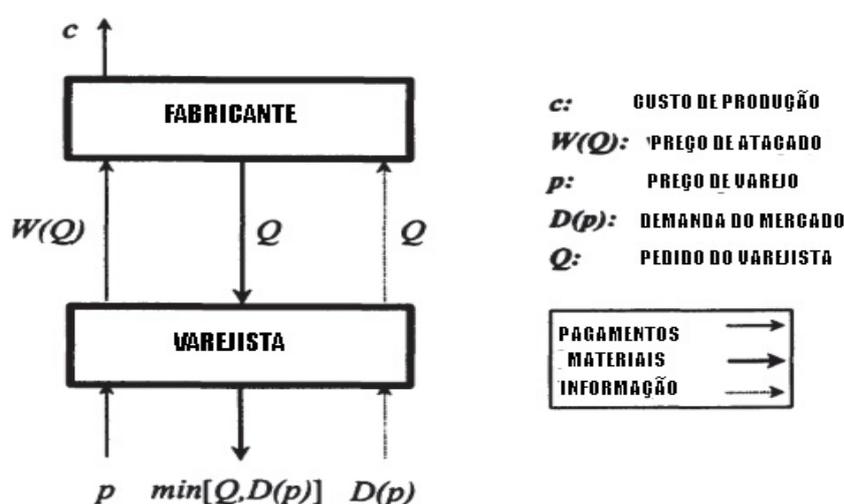
6. VMI - **Vendor Management Inventory**

Com o estoque gerenciado pelo fornecedor, o fabricante ou fornecedor é o responsável por todas as decisões de estoque de produtos no varejista (CHOPRA; MEINDL, PETER, 2012). Em algumas aplicações desse sistema, o fornecedor simplesmente gerencia o produto no centro de distribuição do varejista e o varejista mantém a responsabilidade de reabastecimento do centro de distribuição para as lojas. Em outras aplicações, o fornecedor gerencia o estoque até as prateleiras do varejista (CACHON; TERWIESCH, 2012). Em muitas instâncias do VMI, o estoque é propriedade do fornecedor até que seja vendido pelo varejista. O VMI exige que o varejista compartilhe informações de demanda com o fabricante para permitir que ele tome decisões de reposição de estoque. Isso ajuda a melhorar as previsões do fabricante e melhor corresponder a produção do fabricante à demanda do cliente. O VMI pode permitir que um fabricante aumente seus lucros - bem como os lucros de toda a cadeia de suprimentos - se as margens do varejista e do fabricante forem consideradas ao tomar decisões de estoque (CHOPRA; MEINDL, PETER, 2012).

2.2.2 Conflito de interesses e Contratos de Fornecimento

Tendo tomado conhecimento de alguns dos principais mecanismos de coordenação aborda-se agora especificamente nos contratos. O efeito chicote deteriora o desempenho da cadeia de suprimentos ao propagar a variabilidade da demanda por toda a cadeia de suprimentos. Mas o desempenho ideal da cadeia de abastecimento também não é garantido na ausência do efeito chicote (CACHON; TERWIESCH, 2012). Para entender o que motiva as partes a buscar certas estruturas de contrato, tomemos como exemplo a simples cadeia de suprimento da figura 16.

Figura 16 – Cadeia de Suprimentos



Fonte: Traduzido de Tsay (1999)

No mundo ideal, os lucros totais esperados da cadeia de suprimentos seriam maximizados se todas as decisões fossem tomadas por um único tomador de decisão com acesso a todas as informações disponíveis (TSAY; NAHMIAS; AGRAWAL, 1999). O lucro esperado nesse caso ideal pode ser chamado de Π^c . Na vida real, no entanto, os membros tem objetivos conflitantes e as decisões não são tomadas de maneira descentralizada. Nesse sentido, os lucros de uma estrutura descentralizada pode ser denominado de Π^d . O arranjo será menos eficiente se $\Pi^d < \Pi^c$.

Alguns contratos focam em como Π^d se divide entre os membros da cadeia. Esses contratos visam o compartilhamento de risco, fornecendo um meio para o comprador e o fornecedor compartilharem os riscos decorrentes de várias fontes de incerteza, como a demanda de mercado, o preço de venda, os rendimentos dos processos, a qualidade do produto, o prazo de entrega e as taxas de câmbio (TSAY; NAHMIAS; AGRAWAL, 1999). Vários contratos visam promover o compartilhamento de riscos. Por exemplo, através de contratos com comprometimento de compra mínima, fabricantes podem se proteger de comportamentos aversos aos risco de seus clientes, que sem

esse tipo de arranjo tendem à inflar suas previsões de compra sem qualquer comprometimento. Nesse cenários os riscos dos erros de previsão ficariam todos com o fabricante. Outros contratos visam trazer Π^d cada vez mais próximo de Π^c com o objetivo de melhoria de desempenho de todo o sistema, o que é conhecido como coordenação de canal. A coordenação do canal pode ser alcançada identificando primeiro o que causa a ineficiência na dinâmica interna da cadeia e, em seguida, modificando a estrutura do relacionamento para alinhar mais de perto os incentivos individuais com a otimização global (TSAY; NAHMIAS; AGRAWAL, 1999). Para entender melhor os problemas de coordenação de canal, continuemos com o exemplo dessa mesma cadeia da figura 16. O problema da dupla marginalização ocorre quando o fabricante e o distribuidor aplicam uma margem de lucro ao produto separadamente, sem coordenação, o que implica um rendimento sub-otimizado da cadeia em seu conjunto. Nesse sentido, o distribuidor aplica sua própria margem em cima do preço de venda do fabricante, gerando um preço final resultante que será mais alto do que o caso em que o fabricante monopolista vende diretamente para aos consumidores (SPENGLER, 1950). Na literatura econômica, esse fenômeno é conhecido como uma externalidade que gera perda de peso-morto. Sob o ponto de vista da literatura de estoques, a dupla marginalização faz com que os lucros sejam menores do que o potencial pois a quantidade Q pedida é menor do que a quantidade ótima para a cadeia (o que pode ser demonstrado numericamente pela aplicação de um modelo de demanda estocástica chamado modelo do vendedor de jornais). Por fim, os contratos também facilitam as parcerias de longo prazo ao delinear concessões mútuas que favoreçam a persistência da relação comercial, bem como ao especificar penalidades para comportamentos não-cooperativos (TSAY; NAHMIAS; AGRAWAL, 1999). Alguns dos principais contratos são:

- Contratos de Recompra

Embora o contrato de preço de atacado simples e tradicional geralmente não coordenem a cadeia de abastecimento, os contratos de recompra podem maximizar o lucro da cadeia de abastecimento e aloca-lo arbitrariamente entre as duas empresas. Além disso, contratos de recompra podem proteger a imagem do fornecedor e sua reputação para qualidade. De fato existem complicações potenciais com políticas de devolução e recompra (despesas de envio e manuseio desnecessárias, comportamento irracional onde o varejista compra em excesso). Existem setores em que os aspectos positivo associados às políticas de retorno parecem ser bastante superiores aos negativos como na indústria de livros, em que se estima que 30% a 35% dos livros sejam devolvidos às editoras (CACHON; TERWIESCH, 2012).

- Contratos de Descontos

Existem muitos casos em transações em que a programação de preços permite economias de escala, com preços diminuindo à medida que o tamanho do lote aumenta. Um desconto é baseado no tamanho do lote se a programação de preços oferece descontos com base na quantidade pedida em um único lote. Um desconto é baseado no volume se o desconto é baseado na quantidade total adquirida em um determinado período, independentemente do número de lotes adquiridos durante aquele período. Os dois esquemas de descontos mais utilizados são o desconto em todas as unidades e o desconto marginal unitário, em que diferentes descontos são aplicados à diferentes faixas de quantidades (CHOPRA; MEINDL, PETER, 2012). Independente da forma do contrato de desconto, um incentivo a comprar lotes maiores é gerado sempre que existem descontos.

- Contratos de Opções

Com um contrato de opções, o comprador paga um preço para comprar as opções e outro preço para exercer as opções adquiridas. Esse tipo de contrato é comum no cenário em que um comprador deseja que um fornecedor construa capacidade com antecedência à temporada de vendas. Isso permite que os riscos da cadeia de suprimentos não fiquem todos com o fornecedor, evitando que o mesmo tome uma decisão aversa ao risco de construir pouca capacidade. Isso permitirá com que a cadeia não sofra com a falta de abastecimento que possa vir a acontecer caso a demanda real seja superior à demanda prevista com antecedência pelo comprador (CACHON; TERWIESCH, 2012). O fornecedor ganha pelo menos algo adiantado (o preço da opção) enquanto o comprador não tem que pagar por toda a capacidade não utilizada (o preço de exercício é pago apenas sobre a capacidade efetivamente exercida). Portanto, assim como com os contratos de recompra, os contratos de opções são capazes em alguns ambientes de atingir 100% da eficiência da cadeia de suprimentos (ou seja, o fornecedor constrói a quantidade certa de capacidade) e dividir arbitrariamente o lucro da cadeia de suprimentos entre as duas empresas (CACHON; TERWIESCH, 2012).

- Contratos de Mínimo Comprometimento de Compra

A teoria de estoque tradicional geralmente assume que o comprador pode pedir qualquer quantidade do fornecedor a qualquer momento, afinal, o comprador prefere evitar quaisquer restrições em sua capacidade de atender à demanda de seus próprios clientes de uma forma econômica. No entanto, isso pode ser indesejável do ponto de vista do fornecedor por uma série de razões (TSAY; NAHMIAS; AGRAWAL, 1999). Por exemplo, mesmo quando a demanda do comprador é certa, os custos de produção do fornecedor deverão ser maiores quando o pedido do comprador é menor, então caso a quantidade de compra ideal sob o ponto de vista do comprador seja exatamente a sua demanda conhecida, o

fornecedor enfrentará custos de fabricação maiores do que caso o pedido fosse maior. Como muitas vezes as decisões de capacidade devem ser tomadas com antecedência e sem uma demanda firme, o fornecedor também desejará garantias de que o pedido será próximo à previsão. Uma resposta a este conflito é um acordo em que o comprador concorda previamente em aceitar a entrega de pelo menos uma determinada quantidade de estoque, seja em cada pedido individual ou cumulativamente durante algum período de tempo. Dependendo do poder estratégico relativo das partes, o vendedor pode oferecer ao comprador algumas formas de incentivo, a mais natural das quais é um custo unitário mais baixo nos itens adquiridos sob esse contrato (TSAY; NAHMIAS; AGRAWAL, 1999).

- Contratos de Quantidade Flexível

Uma cláusula de flexibilidade de quantidade define os termos sob os quais a quantidade que um comprador finalmente obtém pode divergir de uma estimativa de planejamento anterior. As condições podem incluir limites no tamanho das mudanças permitidas, nas regras de preços ou ambos (TSAY; NAHMIAS; AGRAWAL, 1999). O benefício para o comprador é evidente caso a situação sem esse contrato fosse de zero flexibilidade, estando o mesmo inclusive disposto à incorrer em custos extras para as unidades que desviassem da previsão inicial. Quando as estimativas de um comprador não implicam necessariamente em um compromisso executável, os compradores tendem à exagerar suas intenções de compra. Imaginemos uma situação em que um comprador tende a enviar suas previsões de maneira otimista visando reservar capacidade do fornecedor. Sabendo o fornecedor que a possibilidade de uma previsão inflacionada é real, ele passa a olhar para essas previsões com um olhar cético e sem responder com criação ou reserva de capacidade, dado que nesse cenário apenas ele próprio incorre nos riscos e custos ocasionados por um excesso de capacidade (CACHON; TERWIESCH, 2012). Tomemos como exemplo o caso de um contrato de flexibilidade de 25% em que o cliente sinaliza uma previsão de 1000 unidades para o quarto trimestre. Sob esse contrato, o fornecedor garantiria capacidade para 1250 unidades enquanto o cliente se compromete com pelo menos 750 unidades quando o quarto trimestre se efetivar. Dessa forma, caso a demanda seja mais baixa que o esperado no quarto trimestre, o fornecedor estará protegido pelo limite inferior enquanto que caso a demanda seja mais alta que o esperado, o cliente saberá que seu fornecedor tem capacidade extra reservada (CACHON; TERWIESCH, 2012). De qualquer forma, cláusulas de flexibilidade tem a intenção do compartilhamento de riscos.

2.2.3 A gestão da cadeia de suprimentos e a pesquisa operacional

Para finalizar o capítulo de revisão de literatura desta monografia, falaremos um pouco sobre a modelagem e os métodos quantitativos mais utilizados para a resolução dos mais variados problemas relacionados à gestão da cadeia de suprimentos. A ideia de usar modelos na solução de problemas e análise de decisão não é nova e certamente não está ligada ao uso de computadores ou restrita à problemas relacionados à cadeias de suprimentos. Em algum ponto, todos nós usamos uma abordagem de modelagem para tomar uma decisão. Por exemplo, ao escolher um prato em um restaurante muito possivelmente você analisa uma série de fatores como qualidade, sabor e preço de uma maneira muito rápida através de um modelo mental. Ao comprar um terreno para construir uma casa, você imagina a disposição e a fachada do imóvel em cada um desses terrenos e toma uma decisão naquele cujo você imagina que mais vá te agradar. Sem precisar construir uma casa em cada terreno para avaliar qual você mais gostaria, é possível tomar uma decisão através de um modelo mental.

Para decisões mais complexas, um modelo mental pode ser impossível ou insuficiente e outros tipos de modelos podem ser necessários (RAGSDALE, 2017). Por exemplo, o conjunto de desenhos ou plantas de uma casa fornece um modelo visual da estrutura do mundo real; carros e aviões tem protótipos e/ou modelos em escala para uma série de testes de engenharia; um globo terrestre é um modelo que visa representar em escala o planeta em que vivemos com um determinado nível de de detalhe. Isso significa dizer que na grande maioria dos casos nós não podemos construir, destruir e fazer alterações a nosso bel prazer, dado que isso pode custar caro e consumir muito tempo. Nesse sentido, a modelagem é uma forma pela qual então podemos resolver problemas do mundo real ao, em um processo de abstração, incluir detalhes que acreditamos ser importantes para análise e deixando de lado os fatores que julgamos ser menos importantes. A modelagem consiste em encontrar soluções para um problema em um mundo livre de riscos, onde é permitido cometer erros, desfazer e recomeçar novamente (BORSHCHEV, 2013).

Quando falamos de problemas de cadeias de suprimentos, os modelos costumam diferir um pouco dos modelos de carros e aviões que utilizamos como exemplo. É nesse contexto que nascem as ciências gerenciais, também conhecida por pesquisa operacional. Pela definição de Bradley, Hax e Magnanti (1977) "as ciências gerenciais são caracterizadas pelo uso de modelos matemáticos para fornecer orientações aos gestores para a tomada de decisões eficazes dentro do estado da informação atual, ou na busca de mais informações se o conhecimento atual for insuficiente para chegar a uma decisão adequada". As raízes da pesquisa operacional podem ser rastreadas há muitas décadas (o modelo EOQ de Harris pode ser considerado um dos primórdios da pesquisa operacional) quando foram feitas as primeiras tentativas de usar uma abordagem científica na gestão de organizações. No entanto, o início da atividade

chamada de pesquisa operacional é geralmente atribuída aos serviços militares no início da Segunda Guerra Mundial, período em que a necessidade de alocar recursos escassos às várias atividades militares em uma maneira eficiente fez com que de fato surgisse uma agenda robusta de pesquisa para problemas operacionais (HILLIER; LIEBERMAN, 2014). Nos tempos atuais o termo **business analytics** vem sendo cunhado quando nos referimos ao processo científico de transformar dados em **insights** poderosos para uma melhor tomada de decisão. Com a disponibilidade cada vez mais massiva de dados como dados de remessas, pedidos, vendas, fornecedores e clientes, bem como dados de e-mails, tráfego na web e redes sociais as firmas podem tomar decisões de maneira muito mais orientada e eficaz. Olhando para o futuro, tanto a pesquisa operacional/ciências gerenciais quanto o business analytics tendem a se fundir com o tempo. Como o nome business analytics é mais significativo para a maioria das pessoas do que o termo pesquisa operacional, pode se descobrir que o termo analytics pode eventualmente substituir a pesquisa operacional como o nome comum para esta disciplina integrada (HILLIER; LIEBERMAN, 2014).

- Modelagem e Análise Descritiva

Aqui a pergunta é: "o que aconteceu?". Modelos descritivos envolvem o uso de técnicas inovadoras para localizar os dados relevantes e identificar padrões de interesse, a fim de melhor descrever e entender o que está acontecendo. Nestes tipos de problemas, o objetivo é descrever o resultado ou comportamento de uma determinada operação ou sistema (RAGSDALE, 2017). Por exemplo, suponha que uma empresa esteja construindo uma nova unidade de manufatura e tenha várias opções sobre os tipos de máquinas a serem instaladas na nova fábrica, bem como várias opções para organizar as máquinas. A administração pode estar interessada em estudar como as várias configurações do maquinário afetariam os embarques de pedidos dentro do prazo (Y), dado o número incerto de pedidos que podem ser recebidos (X_1) e as datas de vencimento incertas (X_2) que podem ser exigidas por estes pedidos. Os valores das variáveis independentes são geralmente desconhecidos ou incertos.

- Modelagem e Análise Preditiva

Aqui a pergunta é: "o que pode acontecer?". Nessa categoria de problemas decisórios, buscamos prever ou estimar o valor que uma variável dependente Y pode tomar quando as variáveis independentes $X_1, X_1, X_2, \dots, X_N$ assumem valores específicos (RAGSDALE, 2010). Se a forma funcional entre as variáveis é especificada, a tarefa de encontrar o valor de Y se torna fácil (basta inputar os valores das variáveis dependentes). No entanto, na grande maioria dos casos a relação entre as variáveis é desconhecida e faz-se necessário estimar parâmetros para se identificar uma função.

- Modelagem e Análise Prescritiva

Aqui, perguntamos: "o que fazer?". Essa categoria final (e mais avançada) é a análise prescritiva, que envolve o uso dos dados para prescrever o que deve ser feito no futuro. As poderosas técnicas de otimização da pesquisa operacional geralmente são usadas aqui (HILLIER; LIEBERMAN, 2014). Nesse tipo de modelagem, as formas funcionais do problema decisório são bastante precisas e bem definidas, o que significa dizer que as relações entre as variáveis independentes X_1, X_2, \dots, X_N e a variável dependente Y são conhecidas (RAGSDALE, 2017).

Vimos que os modelos de estoques vistos nessa revisão de literatura se tratam de modelos prescritivos, onde as variáveis são conhecidas e as formas funcionais derivadas analiticamente. No entanto, esses modelos assumem premissas que muitas vezes não são adequadas para representar de maneira factível os fenômenos complexos que visamos entender. Além disso, vimos que a crescente complexidade que as alterações das premissas desses modelos os tornam muitas vezes intratáveis sob um ponto de vista matemático. Soluções baseadas em fórmulas acabam por não ser eficientes para analisar sistemas dinâmicos como cadeias de suprimento e não capturam influências não intuitiva entre as variáveis, bem como as dependências causais e temporais entre elas. Nesse sentido, a presente monografia utilizará da simulação de eventos discretos como procedimento metodológico para responder à problemática levantada.

3 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos desta pesquisa, faz-se necessário determinar os procedimentos metodológicos adotados. A revisão de literatura apresentada nos permite inferir que essa pesquisa trata-se da elaboração de um modelo quantitativo. Mais especificamente, essa pesquisa utiliza da simulação de eventos discretos para endereçar sua problemática. A ferramenta utilizada para simulação é o AnyLogic, da AnyLogic Company. O software suporta metodologias de simulação baseada em agentes, eventos discretos, e dinâmica de sistemas.

Sob um ponto de vista da tipologia das metodologias quantitativas, podemos dizer que essa pesquisa se trata de uma pesquisa empírica descritiva. Na pesquisa empírica descritiva, estamos interessados em criar um modelo que descreva de forma adequada as relações causais que possam existir na realidade visando uma compreensão do processo real (MIGUEL *et al.*, 2018). A modelagem de simulação é uma metodologia de resolução de problemas indispensável quando queremos descrever e analisar o comportamento de um sistema, fazer perguntas do tipo *what-if* sobre o sistema real e ajudar no projeto e construção do sistema real (BANKS, 1998).

3.1 PRINCIPAIS VANTAGENS DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO

Modelos de simulação de eventos discretos são dinâmicos. Isso significa dizer que a passagem do tempo tem um papel crucial, diferente de modelos analíticos/matemáticos e estatísticos, que são considerados modelos estáticos (ou seja, representam o sistema em um ponto fixo no tempo) (BANKS, 1998). Segundo Banks (1998), as principais vantagens dos modelos de simulação são:

1. Escolher Corretamente

A simulação permite com que cada aspecto de uma mudança proposta seja testada sem que sejam realizados investimentos ou mudanças no sistema real.

2. Aceleração e Diminuição do Tempo

A simulação permite com que o tempo seja acelerado ou desacelerado, permitindo com que a investigação do fenômeno seja feita de maneira minuciosa. É possível simular o desempenho de um ano de um sistema em minutos, ao mesmo tempo que podemos examinar minuciosamente durante horas cada evento ocorrido em um minuto de simulação.

3. Entender os porquês

Frequentemente os gerentes querem entender porque determinados fenômenos ocorrem no mundo real. Com a simulação, é possível reconstruir a cena e fazer uma análise minuciosa do sistemas para encontrar respostas.

4. Explorar possibilidades

Uma vez modelado, é possível explorar uma gama de políticas de decisão, procedimentos operacionais, arranjos e métodos sem qualquer impacto no sistema real.

5. Diagnosticar problemas

Uma série de problemas fabris e de cadeias de suprimentos acabam por se tornar tão complexos que fica praticamente impossível considerar todas as interações que acontecem em um dado momento. Nesse sentido, a simulação nos permite entender as interações entre as variáveis que tornam esses sistemas complexos. Diagnosticar os problemas e ganhar insights sobre a importância dessas variáveis aumenta o entendimento de seus efeitos na performance no sistema.

6. Identificar restrições

Gargalos de produção são muito mais um efeito do que uma causa. Ao utilizar da simulação, é possível descobrir as causas dos atrasos nos processos.

7. Visualizar o sistema

A grande maioria dos pacotes de simulação incorpora em sistemas CAD, GIS, entre outras bibliotecas de marcação de espaço que permitem a visualização da animação do comportamento do sistema, o que pode ser de extrema valia para a gerência.

A construção de um modelo de pesquisa operacional, em geral, envolve dois processos de abstração. Primeiramente, cria-se um modelo conceitual em que apenas uma fração das variáveis originais que definem o sistema real é considerada. Esse processo de abstração é central no caso de pesquisa empírica quantitativa (MIGUEL *et al.*, 2018). Em seguida, o modelo conceitual é abstraído em um modelo matemático analítico (isto é, em que a descrição das relações do sistema pode ser expressa por funções matemáticas) ou em um modelo experimental de simulação (isto é, que procura emular por meio de relações lógicas o funcionamento do sistema), para representar satisfatoriamente o sistema. Dessa forma, uma análise qualitativa precede a análise quantitativa.

3.2 PRINCIPAIS CONCEITOS NA SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS

Segundo Banks (1998) os principais conceitos que vem à tona quando falamos de sistemas dinâmicos estocásticos, ou seja, sistemas que envolvem o tempo e contêm elementos aleatórios que mudam de maneira discreta são:

- Sistema: um conjunto de entidades (como por exemplo, pessoas e máquinas), que interagem em conjunto ao longo do tempo;
- Modelo: uma representação abstrata de um sistema através de relações estruturais, lógicas e matemáticas que descrevem o sistema em termos de estado, entidades, bem como seus conjuntos, processos, eventos, atividades e atrasos;
- Estados: uma coleção de variáveis que contém as informações necessárias para descrever o sistema à qualquer momento;
- Entidades: objetos ou componentes que são representados explicitamente no modelo, tais como um servidor, um cliente ou máquina;
- Atributos: propriedades e características de uma determinada entidade (como por exemplo: o nível de prioridade de um cliente que espera em uma fila);
- Lista: um conjunto de entidades associadas (permanente ou temporariamente), ordenadas de alguma forma lógica (como todos os clientes atualmente em uma fila de espera, ordenadas por "ordem de chegada" ou por prioridade);
- Evento: uma ocorrência que altera o estado de um sistema (como por exemplo, a chegada de um novo cliente);
- Atividade: uma duração de tempo de duração especificado (como por exemplo, um tempo de serviço). Essa duração é conhecida, mesmo que seja uma distribuição estatística;
- Atraso: uma duração de tempo duração indefinida;
- Relógio: uma variável que representa o tempo simulado;

3.3 PASSOS PARA O ESTUDO DE SIMULAÇÃO

É proposta uma variação da metodologia de Banks (1998), em que os passos para um estudo de simulação se dão conforme a seguir:

1. Formulação do Problema

Todo estudo de simulação começa com uma definição clara do problema à ser estudado. É essencial que as partes interessadas no estudo de simulação entendam e validem o conjunto de premissas e hipóteses à serem levados em conta no modelo.

2. Definição de Objetivos

Através dos objetivos definimos quais as questões devem ser respondidas pelo estudo de simulação. O planejamento de projeto deve incluir os vários cenários

a serem investigados. Além disso, os planos para o estudo devem ser indicados em termos dos requisitos do tempo necessário, dos recursos humanos que serão necessários, dos requisitos de software e hardware, etc.

3. Conceitualização do Modelo

Nessa etapa o sistema do mundo real sob investigação é abstraído em um modelo conceitual através de uma série de relações lógicas e matemáticas das estruturas e componentes do sistema. É recomendado começar de maneira simples e ir adicionando a complexidade aos poucos.

4. Coleta de Dados

Existe uma constante interação entre a construção do modelo e a necessidade da coleta de dados de entrada. Como a complexidade do modelo muda, os elementos de dados necessários também podem mudar. É recomendável que a coleta de dados comece o quanto antes em um estudo de simulação, dado que ela é uma das atividades que pode consumir mais tempo.

5. Tradução, Verificação e Validação do Modelo

A maioria dos sistemas do mundo real resulta em modelos que requerem uma grande quantidade de armazenamento de informações e carga computacional, portanto, o modelo deve ser inserido em um formato reconhecível por computadores. As linguagens de simulação são poderosas e flexíveis, no entanto, são raramente utilizadas nos dias de hoje onde podemos encontrar uma série de fornecedores de softwares de simulação que trazem consigo uma série de pacotes e recursos que facilitam a modelagem e aumentam sua flexibilidade. A verificação, por sua vez, consiste em garantir que o modelo computacional esteja performando de maneira correta. Com modelos complexos, é difícil, se não impossível, traduzir um modelo com êxito em sua totalidade sem uma boa dose de depuração; se os parâmetros de entrada e a estrutura lógica do modelo estiverem corretamente representados no computador, a verificação foi concluída. Na maioria das vezes, é necessário uma boa dose de bom senso para concluir esta etapa. Já a validação consiste na determinação se o modelo conceitual é uma representação precisa do sistema real. A validação geralmente é obtida por meio da calibração do modelo, em um processo iterativo de comparação do modelo com o comportamento real do sistema e usando as discrepâncias entre os dois e os insights obtidos para melhorar o modelo. Este processo é repetido até que uma precisão aceitável seja alcançada. Segundo Banks (1998), a maioria dos métodos para validação e verificação são comparações subjetivas informais; alguns são procedimentos estatísticos formais. Neste trabalho, a validação e verificação são realizadas através de comparações subjetivas informais.

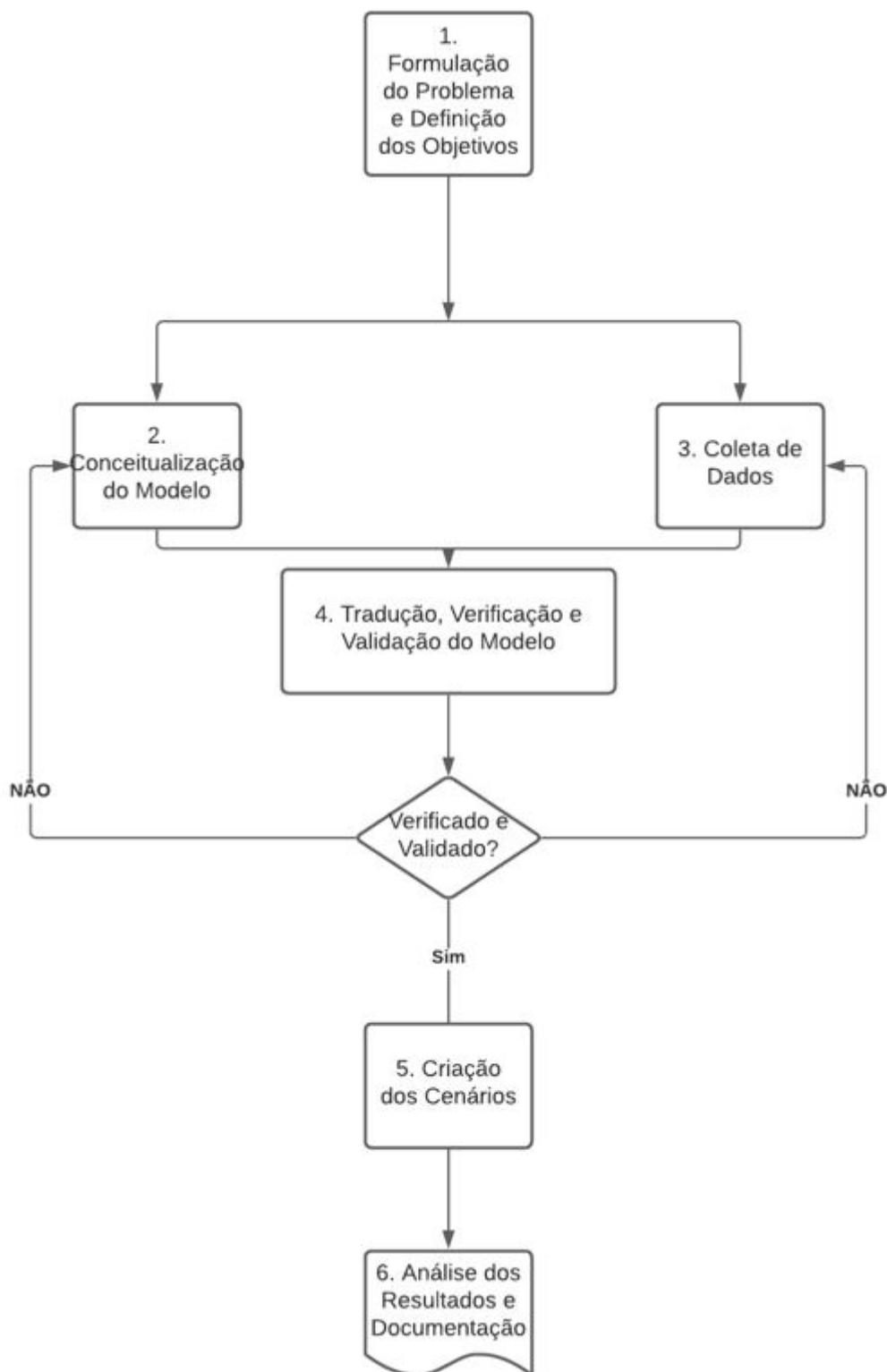
6. Criação dos Cenários

Um dos usos mais importantes da simulação é a comparação dos desempenhos de mais de um sistema. Sendo assim, após ter desenvolvido o modelo cenário-base, as alternativas a serem simuladas são determinadas visando solucionar à problemática e atender aos objetivos do trabalho.

7. Análise dos Resultados e Documentação

Os resultados obtidos em cada cenário e uma discussão sobre os resultados das variáveis de saída do modelo devem ser apresentados.

Figura 17 – Metodologia



Fonte: Autor (2020)

4 APLICAÇÃO A UM CASO PRÁTICO

Conforme a metodologia de Banks modificada apresentada no capítulo anterior a primeira macrofase consiste na etapa de formulação do problema e definição dos objetivos e é um período de descoberta ou orientação. A declaração inicial do problema é geralmente bastante confusa, aqui então os objetivos iniciais geralmente são definidos e o plano do projeto original geralmente é ajustado.

4.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS

Nesse sentido, temos que a na primeira macrofase a declaração do que queremos. Conforme já exposto no capítulo 1, a problemática do trabalho pode ser traduzida em quais políticas de estoque e quais mecanismos para uma maior coordenação de uma cadeia de suprimentos complexa e que enfrenta altos *lead times* devem ser adotados e quais devem ser evitados? As perguntas à serem respondidas pelo trabalho consistem em:

- Quais os parâmetros (R, S) que melhor coordenam a cadeia de suprimentos em cada nível?
- Existe uma melhoria de eficiência na cadeia ao levar em conta os estoques à jusante na determinação da posição de estoque?
- Contratos de comprometimento mínimo podem ajudar a cadeia a ter uma melhor divisão de seus custos?
- São necessários outros mecanismos que, se utilizados junto aos contratos, permitam à cadeia atingir maior coordenação?
- Quão piores seriam os resultados da cadeia caso cada membro tomasse decisões baseado nos pedidos que recebe da etapa à jusante da cadeia e não na demanda do cliente final?
- Mudanças na distribuição da demanda do cliente final impactam a cadeia de que forma?

Queremos avaliar e encontrar, portanto, políticas de estoque e eventualmente cláusulas contratuais que permitam com que a cadeia de suprimentos em questão seja mais coordenada. Na revisão de literatura vimos que evitar o efeito chicote e encontrar mecanismos que coordenem a cadeia de suprimentos é um grande desafio. Assim, dentre os cenários avaliados, avaliaremos em quais deles a cadeia responde com melhores custos e níveis de entrega, bem como a distribuição desses custos entre os membros da cadeia.

A segunda macrofase está relacionada à construção do modelo e coleta de dados e inclui as etapas 3 (Conceituação do Modelo), 4 (Coleta de Dados) e 5 (Tradução, Verificação e Validação do Modelo). É necessária uma interação contínua entre essas etapas. Nesse sentido, o modelo de simulação é uma abstração do sistema real sob estudo. Abordaremos, portanto, a maneira como foi modelada a cadeia de suprimentos da qual a empresa fabricante de equipamentos faz parte e justificaremos os dados de entrada para o modelo de simulação.

4.2 CONCEITUALIZAÇÃO DO MODELO

No mundo real, a empresa fabricante de equipamentos, embora seja a desenvolvedora e a detentora dos projetos, compra as placas de circuito impresso que são utilizadas em seus produtos já montadas de um provedor de serviços de manufatura de eletrônicos (EMS - **electronics manufacturing services**). Desde a década de 1980, uma série de fabricantes originais de equipamentos passou a terceirizar a montagem e testes de placas de circuito impresso visando focar em suas competências principais. Esse tipo de decisão permitiu com que os preços caíssem substancialmente na indústria de eletrônicos, dado que a operação de montagem de placas exige um maquinário caro e os componentes eletrônicos - comuns entre as mais diversas aplicações - têm seus preços bastante sensíveis às quantidades. Com a terceirização das operações de montagem e ao processo de compra dos componentes, os fornecedores de serviços de manufatura de eletrônicos trazem ganhos de escala e redução de custo substanciais para os fabricantes. A rápida mudança e a incerteza da demanda enfrentada pelos fabricantes de equipamentos permitiu com que os fornecedores de EMS agregassem valor e diluíssem os riscos por meio da agregação no projeto, aquisição, transporte e fabricação dos componentes.

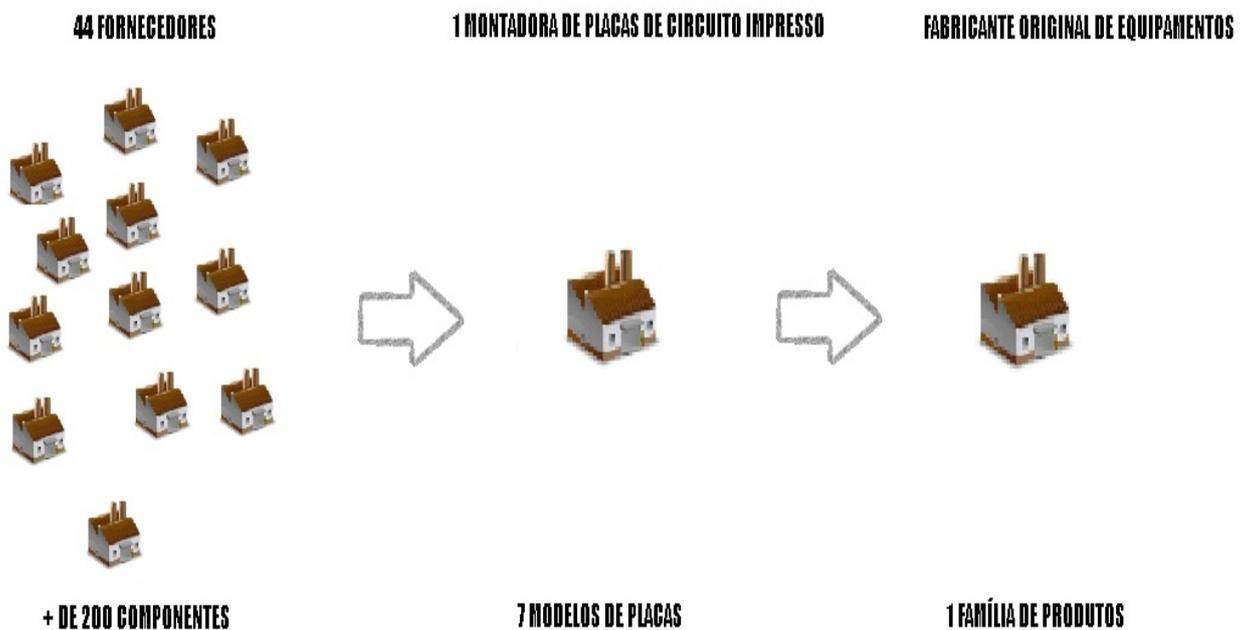
A empresa em questão fabrica 10 linhas de produtos. Uma das famílias corresponde à linha de switches, que são dispositivos que permitem a conexão e comunicação entre vários dispositivos de uma rede. Os switches gerenciam o fluxo de dados em uma rede, transmitindo pacotes de rede recebidos apenas para um ou mais dispositivos aos quais pacotes se destinam. Nesse sentido, cada dispositivo em rede conectado a um switch pode ser identificado por seu endereço de rede, permitindo que o switch direcione o fluxo de tráfego, maximizando a segurança e a eficiência da rede. A família de switches é modularizável e pode ter uma infinidade de combinações possíveis. Dentre os demais componentes mecânicos, componentes eletrônicos, cabos, etiquetas e demais itens necessários para montar um switch, a família conta em sua estrutura sete tipos de placas. Focaremos então, na cadeia de suprimentos para as placas de circuito impresso:

- Placa principal - 1 unidade/switch

- Placa de porta USB - 1 unidade/switch
- Placa de segurança contra falhas - 1 unidade/switch
- Placa fonte de corrente direta - 0, 1 ou 2 unidades/switch
- Placa fonte de corrente alternada - 0, 1 ou 2 unidades/switch
- Placa módulo ETH - 0, 1, 2, 3, 4, 5 ou 6 unidades/switch
- Placa módulo SFP - 0, 1, 2, 3, 4, 5 ou 6 unidades/switch

Para a manufatura dos 7 tipos de placas que são necessárias para a montagem dos switches são necessários mais de 200 componentes que são fabricados por 44 fornecedores diferentes. A figura 18 representa um esquema da cadeia de suprimentos real:

Figura 18 – Cadeia de Suprimentos Real



Fonte: Autor (2020)

No entanto, no nosso modelo abstraído, trataremos os 44 fornecedores dos mais de 200 componentes como apenas um fabricante de um componente. Da mesma forma, trabalharemos o conjunto de 7 placas como apenas um componente (que é o mesmo que componente que vem dos fabricantes). A ideia principal aqui é a da simplificação, pois ao transformar um problema de múltiplos itens e múltiplos fornecedores em um problema de apenas um item e um fornecedor a tarefa de modelagem se torna substancialmente mais simples, sem grandes perda da qualidade da análise.

É importante lembrar que o nível de abstração a ser utilizado é muito mais uma arte do que uma ciência. Podemos tornar o nosso modelo mais ou menos detalhado: não existe uma regra. O importante é que os elementos principais à serem considerados na análise estejam incorporados no modelo, sejam verificados e validados. Nesse sentido, nosso problema passa a ser análogo ao de um fabricante que distribui um produto para um atacadista, que por sua vez vende seus produtos para um varejista. A cadeia de suprimentos modelada é como na figura 19:

Figura 19 – Cadeia de Suprimentos Simulada

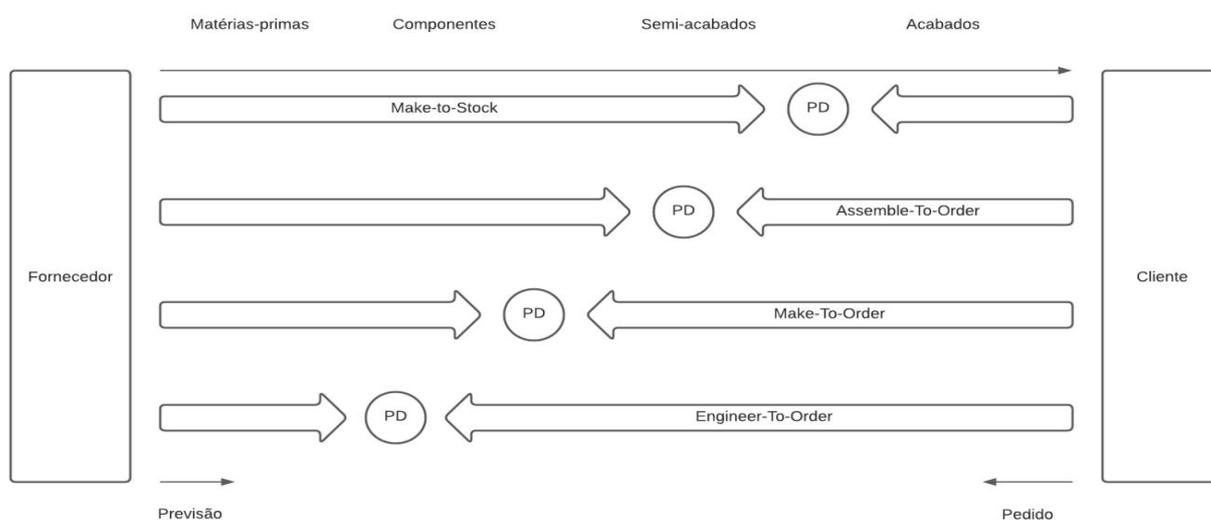


Fonte: Autor (2020)

Podemos fazer isso pois podemos considerar que o *lead time* do componente único utilizado no modelo de simulação é igual ao *lead time* do componente com o pior *lead time* dentre todos no mundo real. Por exemplo, caso um determinado capacitor tenha seu *lead time* de 4 meses enquanto todos os outros componentes tem *lead time* de 3 meses, utilizaremos o *lead time* de 4 meses como o *lead time* do componente no fornecedor dado que nada adianta termos todos os outros componentes em 3 meses se ainda sim existir a falta de um componente. Em outras palavras: *Lead Time* de Fornecimento do Componente = $\max(\text{Lead Time de Fornecimento do Componente 1}, \text{Lead Time Fornecimento do Componente 2}, \dots, \text{Lead Time de Fornecimento do Componente N})$. Por outro lado, o *lead time* de processamento na montadora de placas no mundo real corresponde ao tempo de montagem para os lotes dos 7 modelos de placas diferentes. Como esses 7 modelos foram transformados em apenas um no modelo de simulação, assumiremos um *lead time* de duas semanas.

Outro ponto importante a ser frisado é a posição do ponto de desacoplamento da cadeia. O ponto de desacoplamento consiste no ponto em que o fluxo de material na cadeia deixa de ser direcionada por previsões e passa a ser direcionada por pedidos firmes. À depender das características do sistema de manufatura, da cadeia de suprimentos de um modo geral e dos requisitos dos clientes de um modo geral, esse ponto pode estar mais ou menos próximo do cliente final. A cadeia em questão se trata de um sistema ATO (*assemble-to-order*) ou montagem sob pedido. Como os *lead times* da cadeia são altos (4 meses para importar componentes) e os clientes exigem prazos de entregas curtos para o produto final (uma semana), se torna inviável trabalhar com um sistema plenamente puxado (embora isso fosse desejável de um ponto de vista de estoque). Nesse sentido, todas as decisões de compra (tanto de componentes quanto de placas) quanto de produção de placas são baseadas em previsões, com os pedidos firmes por *switches* sendo apenas o gatilho para o início da montagem dos *switches*. Vimos também que existem uma série de combinações possíveis para os switches, trabalhar com um sistema de montagem sob pedido permite com que a flexibilidade e modularização sejam alcançados.

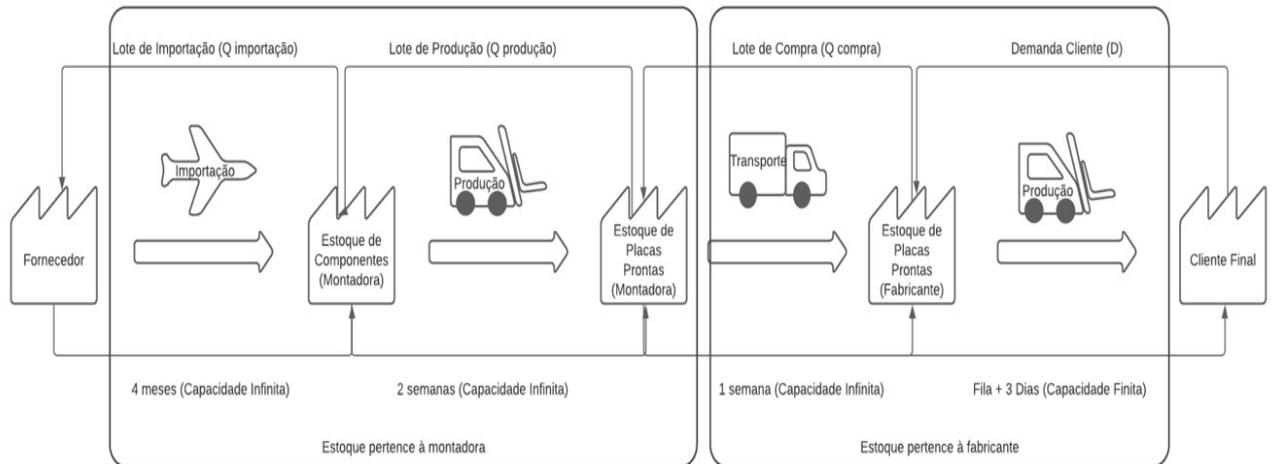
Figura 20 – Ponto de Desacoplamento



Fonte: Autor (2020)

Na figura 21 temos um *framework* geral para a cadeia de suprimentos em questão:

Figura 21 – Modelo Conceitual da Cadeia de Suprimentos



Fonte: Autor (2020)

Uma breve descrição do funcionamento do modelo de simulação se dá a seguir:

- Baseado em sua posição de estoque, na política de reposição e no contrato vigente entre a fabricante e a montadora, o fabricante de *switches* realiza pedido de compras para a montadora de placas;
- Baseado na posição de estoque de placas prontas, na política de reposição e no contrato vigente entre a fabricante e a montadora, a montadora de placas toma decisão de processar os lotes de produção;
- Baseado na posição de estoque de componentes e na política de reposição, a montadora toma decisão de importar mais componentes ou não;
- Os valores unitários do item em cada etapa da cadeia são revisados mensalmente de acordo com os custos performados pela cadeia em cada etapa.

Outros pontos importantes são válidos para todos os cenários modelados:

- É assumido que no início da simulação a montadora conta com 4 meses de estoque em componentes (988 unidades) e com 2 semanas de placas prontas (114 unidades). A fabricante conta com o equivalente à uma semana de demanda + estoque de segurança em estoque (111 unidades).
- A forma da política de estoque é um sistema (R, S) em todos os níveis;
- O estoque passa a pertencer à montadora de placas a partir do momento que sai do fornecedor e inicia-se o período de importação de acordo com os incoterms, que no caso são *ex works* (EXW);

- O estoque passa a pertencer à fabricante de *switches* a partir do momento que as placas saem da montadora e inicia-se o período de transporte, de acordo com a modalidade de frete, que é FOB (*free on board*);
- Os estoques são modelados como filas e a produção e transportes são modelados como *lead times*;
- O período de simulação é de 2 anos;

4.3 COLETA DE DADOS

Alguns inputs básicos serão os mesmos para todos os cenários modelados, principalmente no que tange à estrutura de custos (custos de importação pela montadora, custos de produção da montadora e custos de transporte até a fabricante), à capacidade produtiva, aos *lead times* e à demanda. É importante frisar que essas entradas se mantêm as mesmas em todos os cenários simulados justamente porque queremos analisar a eficiência da cadeia que enfrenta a mesma demanda e tem as mesmas restrições (ou não) de capacidade.

O time de vendas fornece uma previsão de demanda total de 2964 unidades por ano para os próximos dois anos. A partir dessa previsão de demanda, a cadeia passa a se planejar, dado que os *lead times* são longos. A demanda anual é dividida por 52, fornecendo a média esperada de recebimento de pedidos por semana (esperado em média 57 unidades por semana). Isso se dá pois estamos interessados justamente nos efeitos da dinâmica da variabilidade no curto prazo (horizonte semanal). Assumindo que coeficiente de variação da demanda semanal será o mesmo que a série histórica, que é de 75%, temos que o fabricante enfrenta uma demanda distribuída normalmente com média de 57 unidades e desvio padrão de 42,75. Na tabela 1 temos as principais variáveis de entrada do modelo. Os dados referentes aos *lead times* e custos unitários foram fornecidos pela gerência, enquanto as funções de custo são estimativas. As considerações de capacidade infinita no fornecedor e na montadora foram assumidas para fins de simplificação.

4.4 TRADUÇÃO, VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

Foram simulados 18 cenários. Os 14 primeiros cenários consistem em variações no parâmetro R, que é o período entre revisões do estoque, e o parâmetro S, que é o nível de estoque almejado, a cada nível de tomada de decisão (sejam para as ordens de placas feitas pela fabricante, para as ordens de produção de placas na montadora ou as ordens de compra de componentes na montadora). O parâmetro R é

Tabela 1 – Dados e Funções de Entrada do Modelo

Variável	Descrição	Valor
D_{anual}	Demanda Total Anual prevista	2964
$D_{semanal}$	Distribuição Semanal da Demanda	NORMAL(57; 42,5)
$LT_{imp.}$	Lead Time Fabricação + Importação	16 semanas
$LT_{prod.}$	Lead Time Produção	2 semanas
$LT_{trans.}$	Lead Time Transporte	1 semana
$C_{imp.}$	Custo de Importação	$70000 + 80Q_{imp.}$
$C_{prod.}$	Custo de Produção	$10000 + 50Q_{prod.}$
$C_{trans.}$	Custo de Transporte	$1000 + 10Q_{trans.}$
c_1	Valor Unitário de Compra	R\$2029,30
c_2	Valor Unitário Ajustado	$R\$2772,30 + (70000/Q_{imp.}) + 80$
c_3	Valor Unitário Ajustado	$R\$2772,30 + (70000/Q_{imp.}) + 130 + (10000/Q_{prod.})$
V_4	Valor Unitário Ajustado	$R\$3727,7 + (1000/Q_{trans.}) + 10$
K_1	Capacidade do Fornecedor	Infinita
K_2	Capacidade da Montadora	Infinita
K_3	Capacidade da Fabricante	100/semana

Fonte: Autor (2020)

uma variável independente enquanto o parâmetro S é função do parâmetro R. Dessa forma, temos que o parâmetro S é dado por:

$$S = D_{media} \times (R + LT) \quad (39)$$

O parâmetro S é assim determinado pois o nível de estoque desejado para o qual as reposições de estoque são determinadas deve ser suficiente para atender à demanda durante o tempo de revisão e o *lead time* de entrega do pedido. Então, caso a demanda prevista fosse de 50 unidades, o tempo entre revisões (R) fosse de 1 semana e o *lead time* de entrega (LT) fosse de 1 semana, o nível de estoque desejado para as reposições seria de 100 unidades. Reduzir o período entre revisões significar reduzir o nível de estoque almejado e vice-versa.

Em todos os elos da cadeia, os lotes de compra ou produção são variáveis. A decisão de compra vai depender estritamente da posição de estoque no momento da revisão e do nível de estoque almejado. Dessa forma, temos que a posição de estoque é dada por Silver et al. (2016):

$$PE = EM + RP - PC - ES \quad (40)$$

Em que PE é a Posição de Estoque, EM é o saldo de Estoque em Mãos, RP são os recebimentos programados/em aberto da etapa à montante, PC são os pedidos em carteira/em aberto da etapa à jusante e ES é o estoque de segurança. É importante frisar que o estoque de segurança é subtraído da posição de estoque pois ele é um estoque que não deve ser levado em conta no momento de se realizar um pedido, dado que ele está ali justamente promover a proteção do sistema para comportamentos de demanda que estejam acima da média. Os pedidos são definidos como à seguir:

Se $PE \geq S$:

$$Q = 0 \quad (41)$$

Se $PE < S$:

$$Q = S - PE \quad (42)$$

Conforme Chopra e Meindl (2012) e Axsäter (2006), o estoque de segurança em todos os níveis da cadeia é dado por:

$$ES = z \times \sqrt{LT + R} \times \sigma_D \quad (43)$$

Em que z é a estatística que representa o nível de serviço esperado para o ciclo (o inverso da função normal padronizada para dada probabilidade), LT é o *lead time* e σ_D o desvio padrão esperado.

Os valores médio de estoque são computados semanalmente e os custos com manutenção de estoque são computados duas vezes (uma vez a cada ano) de acordo com o estoque médio semanal no momento. Assim sendo, os custos com manutenção de estoque são dados conforme Silver et al. (2016):

$$H = I \times c \times r \quad (44)$$

Em que I é o estoque médio, c é o valor unitário e r é a taxa anual de manutenção dos estoques, estimada em 15%. Dessa forma, o custo total com manutenção de estoques após 2 anos de simulação é dado por:

$$H_{total} = H_{ano1} + H_{ano2} \quad (45)$$

Os custos com pedidos, por sua vez, são dados conforme na tabela 1. Sabemos que os custos com pedidos consistem em:

- Custos com compras de componentes pela montadora (importação);
- Custos com fabricação pela montadora;
- Custos com compras das placas pela fabricante (transporte);

Dessa forma temos que os custos de cada pedido são estimados pelas funções:

$$C_{imp.} = 70000 + 80Q_{imp.} \quad (46)$$

$$C_{prod.} = 10000 + 50Q_{prod.} \quad (47)$$

$$C_{trans.} = 1000 + 10Q_{prod.} \quad (48)$$

Assim sendo, os custos totais de pedido são dados por:

$$C_{pedido,total.} = \sum C_{imp.} + \sum C_{prod.} + \sum C_{trans.} \quad (49)$$

Dessa forma, temos que os custos totais da cadeia são dados por:

$$C_{cadeia,total} = C_{pedido,total} + H_{total} \quad (50)$$

4.5 CRIAÇÃO DOS CENÁRIOS

A ideia principal dos testes para os 14 primeiros cenários consiste em encontrar os parâmetros (R, S) em cada nível que promovam os menores custos para a cadeia de suprimentos dado um nível de serviço estabelecido. Muito embora não seja possível

dizer que as soluções são ótimas, a análise comparativa de cenários permite encontrar a melhor alternativa dentre as simuladas. Para cada cenário, foi rodada uma replicação, com duração de cerca de 2 minutos cada execução (quando executado em velocidade máxima). O procedimento adotado, portanto, consiste em:

- Para um $(R, S)_{placas, fabricante}$ fixo e um $(R, S)_{placas, montadora}$ fixo, são testados 6 combinações de $(R, S)_{componentes, montadora}$, ou seja, primeiramente é avaliada a melhor combinação (R, S) para a compra de componentes por parte da montadora;
- É escolhida a combinação $(R, S)_{componentes, montadora}$ que oferece o melhor resultado em termos de custos totais da cadeia;
- Para um $(R, S)_{componentes, montadora}$ fixo (o melhor entre os 6 cenários avaliados) e um $(R, S)_{placas, fabricante}$ fixo, são testadas 4 combinações diferentes de $(R, S)_{placas, montadora}$, ou seja, é avaliada a melhor combinação (R, S) para a produção de placas por parte da montadora;
- É escolhida a combinação $(R, S)_{placas, montadora}$ que oferece o melhor resultado em termos de custos totais da cadeia;
- Agora, tendo encontrado a melhor opção de $(R, S)_{componentes, montadora}$ e a melhor opção de $(R, S)_{placas, montadora}$, são testadas 4 combinações de $(R, S)_{placas, fabricante}$, ou seja, é avaliada a melhor combinação (R, S) para compra de placas por parte da fabricante de switches.
- É escolhida a combinação $(R, S)_{placas, fabricante}$ que oferece o melhor resultado em termos de custos totais da cadeia.

A seguir temos as características simuladas em cada cenário.

4.5.1 Cenário 1

O primeiro cenário pode ser considerado um cenário base. Nesse cenário é modelada uma cadeia em que cada elo considera o estoque em mãos como sendo apenas o estoque local, o significado de demanda para cada elo é a demanda do cliente final (que por sinal, deve ser compartilhada pela fabricante com a montadora), não há variação na distribuição de demanda (ou seja, ela se mantém a mesma média e desvio padrão de 57 e 47,5 unidades, respectivamente) e por conta desses fatores, não há uma revisão na demanda prevista, nem no estoque de segurança ou no parâmetro S por parte da montadora ou da fabricante. Neste cenário base, cada elo da cadeia revisa suas posições de estoque semanalmente. Os períodos entre revisão desse cenário base são de 1 semana para cada cenário.

A tabela 2 se refere às principais características do primeiro cenário simulado:

Tabela 2 – Cenário 1

Descrição	Representação no Cenário
Contrato de Comprometimento Mínimo	Não
Estoque em Mãos	Local
Demanda	Cliente Final
Variação na Distribuição da Demanda	Não
Revisão da Demanda Prevista, ES e S	Não
$(R, S)_{placas, fabricante}$	$R_{compra} = 1$ semana; $S = 114$ un.
$(R, S)_{placas, montadora}$	$R_{prod.} = 1$ semana; $S = 171$ un.
$(R, S)_{componentes, montadora}$	$R_{compra} = 1$ semana; $S = 969$ un.

Fonte: Autor (2020)

4.5.2 Cenário 2

Como mencionado anteriormente, os primeiros quatorze cenários consistem em variações dos parâmetros (R, S) em cada elo que deve tomar decisões de reposição na cadeia. Nesse sentido, a mudança do cenário 1 para o cenário 2 consiste nos parâmetros (R, S) para compra de componentes na montadora. Agora, com $R_{componentes, montadora} = 4$ semanas e $S_{componentes, montadora} = 1140$ unidades.

Tabela 3 – Cenário 2

Descrição	Representação no Cenário
Contrato de Comprometimento Mínimo	Não
Estoque em Mãos	Local
Demanda	Cliente Final
Variação na Distribuição da Demanda	Não
Revisão da Demanda Prevista, ES e S	Não
$(R, S)_{placas, fabricante}$	$R_{compra} = 1$ semana; $S = 114$ un.
$(R, S)_{placas, montadora}$	$R_{prod.} = 1$ semana; $S = 171$ un.
$(R, S)_{componentes, montadora}$	$R_{compra} = 4$ semanas; $S = 1140$ un.

Fonte: Autor (2020)

4.5.3 Cenário 3

Nesse próximo cenário, testaremos para $R_{componentes, montadora} = 12$ semanas e $S_{componentes, montadora} = 1596$ unidades.

Tabela 4 – Cenário 3

Descrição	Representação no Cenário
Contrato de Comprometimento Mínimo	Não
Estoque em Mãos	Local
Demanda	Cliente Final
Variação na Distribuição da Demanda	Não
Revisão da Demanda Prevista, ES e S	Não
$(R, S)_{placas, fabricante}$	$R_{compra} = 1$ semana; $S = 114$ un.
$(R, S)_{placas, montadora}$	$R_{prod.} = 1$ semana; $S = 171$ un.
$(R, S)_{componentes, montadora}$	$R_{compra} = 12$ semanas; $S = 1596$ un.

Fonte: Autor (2020)

4.5.4 Cenário 4

Seguindo o procedimento, testaremos agora para $R_{componentes, montadora} = 16$ semanas e $S_{componentes, montadora} = 1824$ unidades.

Tabela 5 – Cenário 4

Descrição	Representação no Cenário
Contrato de Comprometimento Mínimo	Não
Estoque em Mãos	Local
Demanda	Cliente Final
Variação na Distribuição da Demanda	Não
Revisão da Demanda Prevista, ES e S	Não
$(R, S)_{placas, fabricante}$	$R_{compra} = 1$ semana; $S = 114$ un.
$(R, S)_{placas, montadora}$	$R_{prod.} = 1$ semana; $S = 171$ un.
$(R, S)_{componentes, montadora}$	$R_{compra} = 16$ semanas; $S = 1824$ un.

Fonte: Autor (2020)

4.5.5 Cenário 5

Testaremos agora para $R_{componentes, montadora} = 26$ semanas e $S_{componentes, montadora} = 2394$ unidades.

Tabela 6 – Cenário 5

Descrição	Representação no Cenário
Contrato de Comprometimento Mínimo	Não
Estoque em Mãos	Local
Demanda	Cliente Final
Varição na Distribuição da Demanda	Não
Revisão da Demanda Prevista, ES e S	Não
$(R, S)_{placas, fabricante}$	$R_{compra} = 1$ semana; $S = 114$ un.
$(R, S)_{placas, montadora}$	$R_{prod.} = 1$ semana; $S = 171$ un.
$(R, S)_{componentes, montadora}$	$R_{compra} = 26$ semanas; $S = 2394$ un.

Fonte: Autor (2020)

4.5.6 Cenário 6

Por fim, a última combinação de (R, S) para a compra de componetnes é para $R_{componentes, montadora} = 52$ semanas e $S_{componentes, montadora} = 3876$ unidades.

Tabela 7 – Cenário 6

Descrição	Representação no Cenário
Contrato de Comprometimento Mínimo	Não
Estoque em Mãos	Local
Demanda	Cliente Final
Varição na Distribuição da Demanda	Não
Revisão da Demanda Prevista, ES e S	Não
$(R, S)_{placas, fabricante}$	$R_{compra} = 1$ semana; $S = 114$ un.
$(R, S)_{placas, montadora}$	$R_{prod.} = 1$ semana; $S = 171$ un.
$(R, S)_{componentes, montadora}$	$R_{compra} = 52$ semanas; $S = 3876$ un.

Fonte: Autor (2020)

4.5.7 Cenário 7

Tendo encontrado o melhor $(R, S)_{componentes, montadora}$ dentre as 6 possibilidades testadas (que é para $R = 16$ semanas, conforme discutiremos no próximo capítulo), partiremos para o mesmo procedimento visando encontrar o melhor combinação $(R, S)_{placas, montadora}$. Como o cenário em que $R_{componentes, montadora}$ é de 16 de semanas e o $R_{placas, montadora}$ é de 1 semana já foi testado no cenário 4, partiremos do teste para $R_{placas, montadora} = 4$ e $S_{placas, montadora} = 342$.

Tabela 8 – Cenário 7

Descrição	Representação no Cenário
Contrato de Comprometimento Mínimo	Não
Estoque em Mãos	Local
Demanda	Cliente Final
Variação na Distribuição da Demanda	Não
Revisão da Demanda Prevista, ES e S	Não
$(R, S)_{placas, fabricante}$	$R_{compra} = 1$ semana; $S = 114$ un.
$(R, S)_{placas, montadora}$	$R_{prod.} = 4$ semanas; $S = 342$ un.
$(R, S)_{componentes, montadora}$	$R_{compra} = 16$ semanas; $S = 1824$ un.

Fonte: Autor (2020)

4.5.8 Cenário 8

Testaremos agora para $R_{placas, montadora} = 12$ e $S_{placas, montadora} = 798$.

Tabela 9 – Cenário 8

Descrição	Representação no Cenário
Contrato de Comprometimento Mínimo	Não
Estoque em Mãos	Local
Demanda	Cliente Final
Variação na Distribuição da Demanda	Não
Revisão da Demanda Prevista, ES e S	Não
$(R, S)_{placas, fabricante}$	$R_{compra} = 1$ semana; $S = 114$ un.
$(R, S)_{placas, montadora}$	$R_{prod.} = 12$ semanas; $S = 798$ un.
$(R, S)_{componentes, montadora}$	$R_{compra} = 16$ semanas; $S = 1824$ un.

Fonte: Autor (2020)

4.5.9 Cenário 9

Testaremos agora para $R_{placas, montadora} = 26$ e $S_{placas, montadora} = 1596$.

Tabela 10 – Cenário 9

Descrição	Representação no Cenário
Contrato de Comprometimento Mínimo	Não
Estoque em Mãos	Local
Demanda	Cliente Final
Variação na Distribuição da Demanda	Não
Revisão da Demanda Prevista, ES e S	Não
$(R, S)_{placas, fabricante}$	$R_{compra} = 1$ semana; S = 114 un.
$(R, S)_{placas, montadora}$	$R_{prod.} = 26$ semanas; S = 1596 un.
$(R, S)_{componentes, montadora}$	$R_{compra} = 16$ semanas; S = 1824 un.

Fonte: Autor (2020)

4.5.10 Cenário 10

Testaremos agora para $R_{placas, montadora} = 52$ e $S_{placas, montadora} = 3078$.

Tabela 11 – Cenário 10

Descrição	Representação no Cenário
Contrato de Comprometimento Mínimo	Não
Estoque em Mãos	Local
Demanda	Cliente Final
Variação na Distribuição da Demanda	Não
Revisão da Demanda Prevista, ES e S	Não
$(R, S)_{placas, fabricante}$	$R_{compra} = 1$ semana; S = 114 un.
$(R, S)_{placas, montadora}$	$R_{prod.} = 52$ semanas; S = 3078 un.
$(R, S)_{componentes, montadora}$	$R_{compra} = 16$ semanas; S = 1824 un.

Fonte: Autor (2020)

4.5.11 Cenário 11

Tendo encontrado o melhor $(R, S)_{placas, montadora}$ dentre as 4 possibilidades testadas (que é para $R = 4$ semanas, conforme discutiremos no próximo capítulo), partiremos para o mesmo procedimento visando encontrar o melhor combinação $(R, S)_{placas, fabricante}$. Como o cenário em que $R_{placas, montadora}$ é de 4 de semanas e o $R_{placas, fabricante}$ é de 1 semana já foi testado no cenário 7, partiremos do teste para $R_{placas, fabricante} = 4$ e $S_{placas, fabricante} = 285$.

Tabela 12 – Cenário 11

Descrição	Representação no Cenário
Contrato de Comprometimento Mínimo	Não
Estoque em Mãos	Local
Demanda	Cliente Final
Varição na Distribuição da Demanda	Não
Revisão da Demanda Prevista, ES e S	Não
$(R, S)_{placas, fabricante}$	$R_{compra} = 4$ semanas; $S = 285$ un.
$(R, S)_{placas, montadora}$	$R_{prod.} = 4$ semanas; $S = 342$ un.
$(R, S)_{componentes, montadora}$	$R_{compra} = 16$ semanas; $S = 1824$ un.

Fonte: Autor (2020)

4.5.12 Cenário 12

Nesse próximo cenário, testaremos para $R_{placas, fabricante} = 12$ e $S_{placas, fabricante} = 741$ unidades.

Tabela 13 – Cenário 12

Descrição	Representação no Cenário
Contrato de Comprometimento Mínimo	Não
Estoque em Mãos	Local
Demanda	Cliente Final
Varição na Distribuição da Demanda	Não
Revisão da Demanda Prevista, ES e S	Não
$(R, S)_{placas, fabricante}$	$R_{compra} = 12$ semanas; $S = 741$ un.
$(R, S)_{placas, montadora}$	$R_{prod.} = 4$ semanas; $S = 342$ un.
$(R, S)_{componentes, montadora}$	$R_{compra} = 16$ semanas; $S = 1824$ un.

Fonte: Autor (2020)

4.5.13 Cenário 13

Testaremos agora para $R_{placas, fabricante} = 26$ semanas e $S_{placas, fabricante} = 1539$ unidades.

Tabela 14 – Cenário 13

Descrição	Representação no Cenário
Contrato de Comprometimento Mínimo	Não
Estoque em Mãos	Local
Demanda	Cliente Final
Variação na Distribuição da Demanda	Não
Revisão da Demanda Prevista, ES e S	Não
$(R, S)_{placas, fabricante}$	$R_{compra} = 26$ semanas; $S = 1539$ un.
$(R, S)_{placas, montadora}$	$R_{prod.} = 4$ semanas; $S = 342$ un.
$(R, S)_{componentes, montadora}$	$R_{compra} = 16$ semanas; $S = 1824$ un.

Fonte: Autor (2020)

4.5.14 Cenário 14

Por fim, é simulado um cenário para $R_{placas, fabricante} = 52$ semanas e $S_{placas, fabricante} = 3021$ unidades.

Tabela 15 – Cenário 14

Descrição	Representação no Cenário
Contrato de Comprometimento Mínimo	Não
Estoque em Mãos	Local
Demanda	Cliente Final
Variação na Distribuição da Demanda	Não
Revisão da Demanda Prevista, ES e S	Não
$(R, S)_{placas, fabricante}$	$R_{compra} = 52$ semanas; $S = 3021$ un.
$(R, S)_{placas, montadora}$	$R_{prod.} = 4$ semanas; $S = 342$ un.
$(R, S)_{componentes, montadora}$	$R_{compra} = 16$ semanas; $S = 1824$ un.

Fonte: Autor (2020)

4.5.15 Cenário 15

Para entender melhor a dinâmica do efeito chicote, partimos para a compreensão de quais seriam os resultados da cadeia caso cada elo que toma decisões de reposição revisse a demanda prevista com base nos pedidos que recebe da etapa à frente. Aqui, a intenção é entender se (e quanto) pior seriam os resultados apenas pela falta de compartilhamento de informação da demanda do cliente final e consequente distorção das considerações sobre a demanda, mesmo tendo encontrado os melhores parâmetros (R, S) entre os 14 primeiros cenários testados. Como o estoque de segurança é função do desvio padrão da demanda e o parâmetro S é função da demanda prevista, a revisão da demanda prevista com base nos pedidos recebidos por cada elo

faz com que os valores de ambas as variáveis sejam revisados durante a simulação trimestralmente.

Tabela 16 – Cenário 15

Descrição	Representação no Cenário
Contrato de Comprometimento Mínimo	Não
Estoque em Mãos	Local
Demanda	Pedidos recebidos do elo à jusante
Varição na Distribuição da Demanda	Não
Revisão da Demanda Prevista, ES e S	Trimestral
$(R, S)_{placas, fabricante}$	$R_{compra} = 1$ semana; $S = 114$ un.
$(R, S)_{placas, montadora}$	$R_{prod.} = 4$ semanas; $S = 342$ un.
$(R, S)_{componentes, montadora}$	$R_{compra} = 16$ semanas; $S = 1824$ un.

Fonte: Autor (2020)

4.5.16 Cenário 16

Visando atender os objetivos do trabalho e tendo encontrado o melhor conjunto de parâmetros (R, S) para cada elo da cadeia (que serão discutidos no próximo capítulo) nos 14 primeiros cenários, agora testaremos a hipótese de que resultados ainda melhores serão obtidos caso cada elo que toma decisões de reposição considere os estoques à jusante como sendo parte do estoque em mãos. Assim como nos 14 primeiros cenários, não são consideradas variações na distribuição da demanda e nem são revisados o estoque de segurança, a previsão da demanda (e portanto, o parâmetro S), dado que neste cenário todos os elos compreendem a demanda como sendo a demanda do cliente final.

Tabela 17 – Cenário 16

Descrição	Representação no Cenário
Contrato de Comprometimento Mínimo	Não
Estoque em Mãos	Estoque de Escalão (à jusante)
Demanda	Cliente Final
Varição na Distribuição da Demanda	Não
Revisão da Demanda Prevista, ES e S	Não
$(R, S)_{placas, fabricante}$	$R_{compra} = 1$ semana; $S = 114$ un.
$(R, S)_{placas, montadora}$	$R_{prod.} = 4$ semanas; $S = 342$ un.
$(R, S)_{componentes, montadora}$	$R_{compra} = 16$ semanas; $S = 1824$ un.

Fonte: Autor (2020)

4.5.17 Cenário 17

Tendo encontrado os melhores parâmetros (R, S) e tendo testado a hipótese de que considerar os estoques à jusante no dimensionamento do estoque em mãos melhora o desempenho da cadeia, partiremos para um cenário em que existe um contrato de comprometimento mínimo entre a montadora e a fabricante. Neste cenário, a fabricante de switches se compromete a levar todo o excesso/saldo de placas existente na montadora. A cada três meses a montadora produz tantas placas quanto seja possível (com duas semanas de antecedência) com o saldo de componentes que tem em estoque e a fabricante se compromete a comprar esse saldo. A ideia principal no teste desse cenário é entender se esse tipo de contrato pode dividir melhor o ônus da cadeia e gerenciar os possíveis conflitos de interesse.

Tabela 18 – Cenário 17

Descrição	Representação no Cenário
Contrato de Comprometimento Mínimo	Sim
Estoque em Mãos	Estoque de Escalão (à jusante)
Demanda	Cliente Final
Varição na Distribuição da Demanda	Não
Revisão da Demanda Prevista, ES e S	Não
$(R, S)_{placas, fabricante}$	$R_{compra} = 1$ semana; $S = 114$ un.
$(R, S)_{placas, montadora}$	$R_{prod.} = 4$ semanas; $S = 342$ un.
$(R, S)_{componentes, montadora}$	$R_{compra} = 16$ semanas; $S = 1824$ un.

Fonte: Autor (2020)

4.5.18 Cenário 18

Por fim, a última consideração a se fazer é quais seriam os resultados (principalmente em termos de abastecimento) caso existisse uma mudança na distribuição da demanda ao longo da simulação. Nesse sentido, é simulado um cenário em que há um aumento de 10% ao trimestre na demanda média e consequente aumento no desvio padrão (pois é considerado que o coeficiente de variação da demanda de 75% se manterá o mesmo). A ideia principal é testar os efeitos que a falta de utilização de nova informação para rever as previsões de demanda, os estoques de segurança e os parâmetros S podem gerar no nível de serviço e nos custos da cadeia de suprimentos.

Tabela 19 – Cenário 18

Descrição	Representação no Cenário
Contrato de Comprometimento Mínimo	Sim
Estoque em Mãos	Estoque de Escalão (à jusante)
Demanda	Cliente Final
Variação na Distribuição da Demanda	Aumento de 10% ao trimestre
Revisão da Demanda Prevista, ES e S	Não
$(R, S)_{placas, fabricante}$	$R_{compra} = 1$ semana; $S = 114$ un.
$(R, S)_{placas, montadora}$	$R_{prod.} = 4$ semanas; $S = 342$ un.
$(R, S)_{componentes, montadora}$	$R_{compra} = 16$ semanas; $S = 1824$ un.

Fonte: Autor (2020)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após ter rodado a simulação para cada cenário, partiremos para uma discussão detalhada dos resultados e das principais métricas a serem analisadas. Em termos de abastecimento, as principais métricas consistem em:

Tabela 20 – Dados de Saída de Abastecimento

ABASTECIMENTO
Total de Pedidos Recebidos
Total de Pedidos Entregues
Taxa de Abastecimento = $\frac{\text{Total de Pedidos Entregues}}{\text{Total de Pedidos Recebidos}}$
Total Pedidos em Produção + Fila
Taxa de Disponibilidade = $\frac{\text{Total de Pedidos Entregues} + \text{Total Pedidos em Produção e Fila}}{\text{Total de Pedidos Recebidos}}$
LT Médio de Entrega para o Cliente Final
Dias Estoque da Fabricante Desabastecido

Fonte: Autor (2020)

Temos que as principais métricas para os custos de pedido e custos de manutenção de estoque para cada membro são conforme discutido no capítulo 4.

Tabela 21 – Custos com Pedido na Montadora

CUSTOS COM PEDIDOS NA MONTADORA
Custos com Pedidos (Importação) - $C_{imp.}$
Custos com Pedidos (Produção) - $C_{prod.}$

Fonte: Autor (2020)

Tabela 22 – Custos com Pedido na Fabricante

CUSTOS COM PEDIDOS NA FABRICANTE
Custos com Transporte - $C_{trans.}$

Fonte: Autor (2020)

Tabela 23 – Custos com Manutenção de Estoques

CUSTOS COM MAN. DE ESTOQUE NA MONTADORA - $H_{mon.}$
CUSTOS COM MAN. DE ESTOQUE NA FABRICANTE - $H_{fab.}$

Fonte: Autor (2020)

Tabela 24 – Custos da Cadeia

CUSTOS TOTAIS DA CADEIA
$C_{total,cadeia} = \sum C_{imp.} + \sum C_{prod.} + \sum C_{trans.} + H_{mon.} + H_{fab.}$

Fonte: Autor (2020)

Como métricas para medir a quantidade de ordens que flui na cadeia e a variabilidade das ordens, e portanto, o efeito chicote.

Tabela 25 – Métricas de Pedido e Efeito Chicote

QUANTIDADE DE PEDIDOS E EFEITO CHICOTE
Total de Ordens de Compra do Cliente Final ($Q_{total,cliente}$)
Total de Ordens de Compra da Fabricante ($Q_{total,oc,fab.}$)
Total de Ordens de Produção da Montadora ($Q_{total,op,mon.}$)
Total de Ordens de Compra da Montadora ($Q_{total,oc,mon.}$)
Coefficiente de Variação das Ordens de Compra do Cliente Final ($CV_{oc,cliente}$)
Coefficiente de Variação das Ordens de Compra da Fabricante ($CV_{oc,fabricante}$)
Coefficiente de Variação das Ordens de Produção da Montadora ($CV_{op,montadora}$)
Coefficiente de Variação das Ordens de Compra da Fabricante ($CV_{oc,montadora}$)

Fonte: Autor (2020)

Os estoques médios para cada membro são:

$$I_{montadora} = I_{imp.} + I_{componentes} + I_{WIP,montadora} + I_{placas,montadora} \quad (51)$$

$$I_{fabricante} = I_{trans.} + I_{placas,fabricante} + I_{WIP,fabricante} \quad (52)$$

Ou seja, a montadora tem como posse em seu estoque todos os componentes que já saíram do fornecedor (e portanto, estão em processo de importação), os componentes em seu estoque, o trabalho em processo (do inglês *Work in Process* - *WIP*) e o estoque de placas prontas. Já a fabricante tem sob sua posse o estoque em transporte

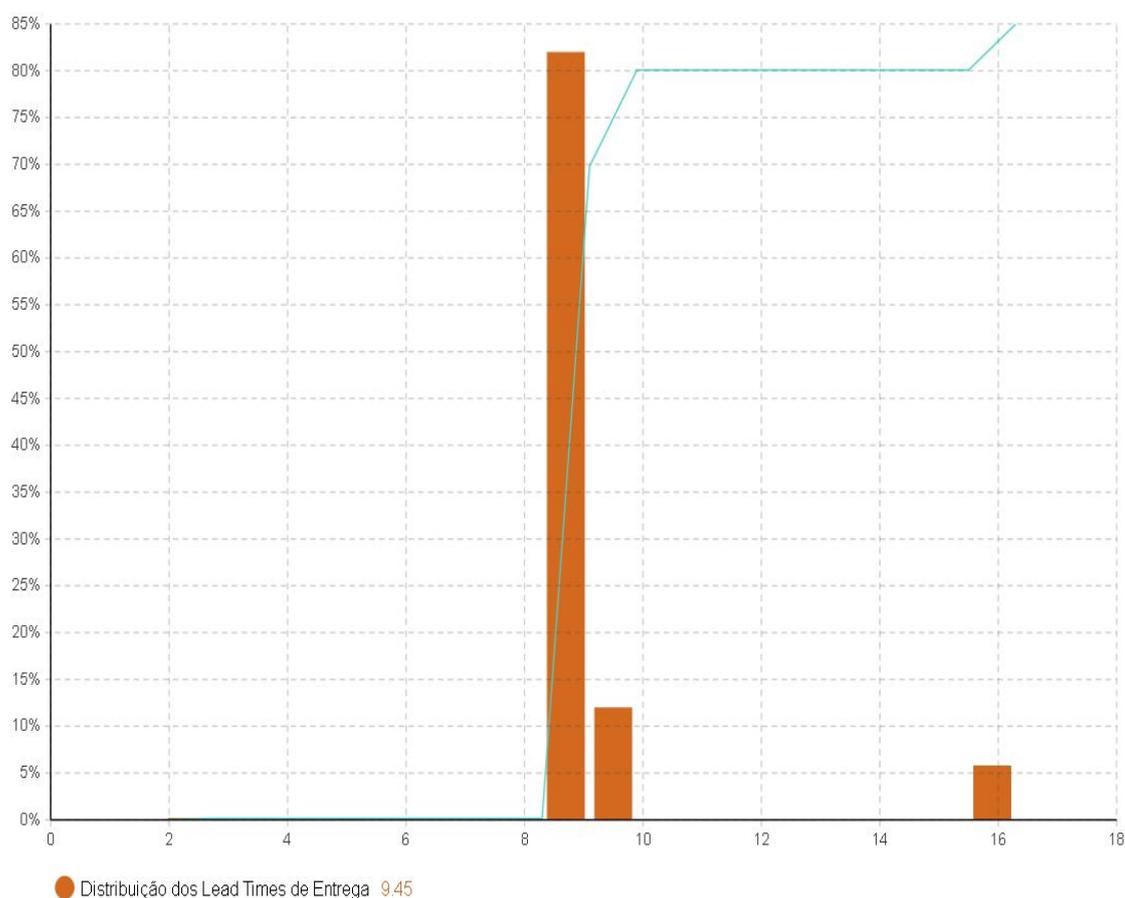
da montadora para a fabricante, o estoque de placas e o trabalho em processo em sua produção.

Vimos também que os valores unitários à cada etapa são dependentes dos custos de pedidos. Mensalmente, os custos de pedidos são diluídos no valor unitário dos componentes. Estratégias de reposição mais custosas irão fazer com que o valor dos componentes aumentem e vice-versa.

5.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS CENÁRIO 1, 2, 3, 4, 5 E 6

No que tange ao abastecimento, nos 6 cenários a distribuição dos lead times de entrega é a mesma, com média de 9,45 dias.

Figura 22 – Distribuição dos lead times de entrega nos 6 primeiros cenários



Fonte: Autor (2020)

A tabela 26 traz os dados de abastecimento para os 6 cenários simulados.

Tabela 26 – Métricas de Abastecimento - 6 Primeiros Cenários

Total de Pedidos Recebidos	6011
Total de Pedidos Entregues	5924
Taxa de Abastecimento	98,55%
Total Pedidos em Produção + Fila	87
Taxa de Disponibilidade	100%
LT Médio de Entrega para o Cliente Final	9,45
Dias Estoque da Fabricante Desabastecido	0

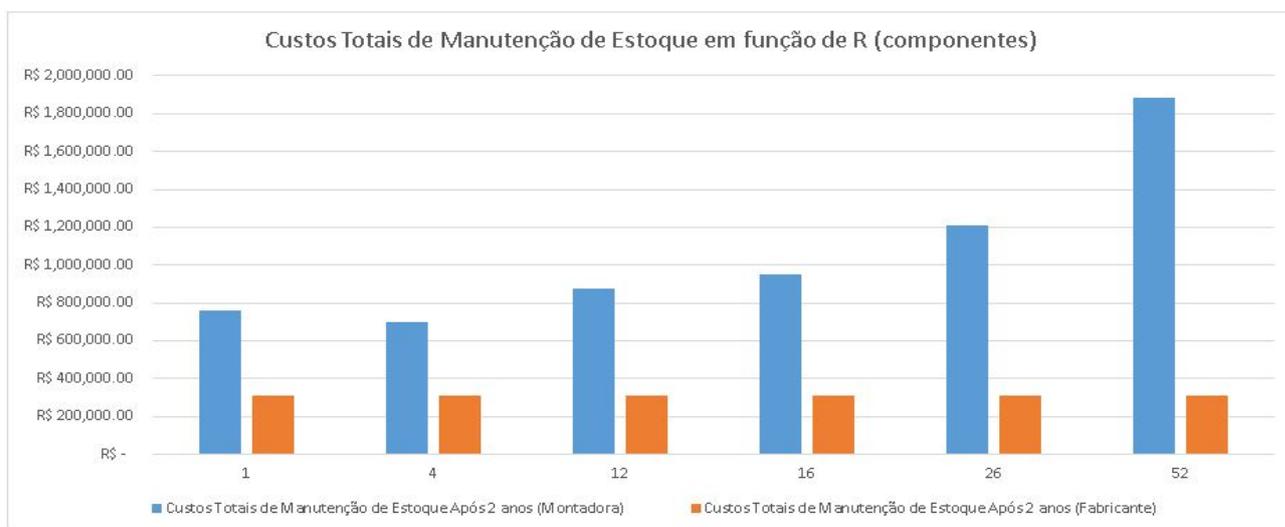
Fonte: Autor (2020)

Mesmo que em todos os cenários as métricas para o abastecimento sejam as mesmas, os custos variam de acordo com cada cenário simulado, conforme o esperado. É de esperar que os custos totais de manutenção de estoque após 2 anos de simulação aumentem conforme os períodos entre revisão aumentam, dado que os estoques médios de componentes passam a ser maiores. No entanto, esse aumento de custos nos estoques onera apenas a montadora, que é quem detém a posse dos componentes. Os custos de manutenção de estoque na fabricante se mantêm os mesmos pois nesses 6 primeiros cenários são testadas mudanças apenas na estratégia de reabastecimento dos componentes (o que significa dizer que as estratégias das etapas à jusante se mantêm as mesmas). Como não há nenhuma ruptura no abastecimento para a fabricante e não há nenhuma mudança no padrão da demanda nos cenários, não existem alterações na oferta ou na demanda que façam com que a fabricante apresente diferenças nos seus níveis de estoque e conseqüentemente nos seus custos de manutenção. Por conta disso, os custos de manutenção para a fabricante se mantêm estáveis em R\$307.562,03 em todos os 6 cenários. É interessante notar que no primeiro cenário os custos com estoque são maiores mesmo com o menor período de revisão entre os cenários avaliados. Isso se dá pois por ser uma estratégia extremamente mais cara, o valor unitário com que os componentes são avaliados no estoque da montadora fica substancialmente maior (é importante lembrar que o valor com que os materiais são avaliados leva em conta os custos com pedidos diluídos, prática contábil comum).

Por outro lado, os custos com pedidos caem substancialmente. Isso se dá pois períodos entre revisões maiores fazem com que menos pedidos sejam gerados. Como cada pedido tem um custo fixo de R\$70.000,00, uma menor quantidade de ordens de compra de componentes por parte da montadora diminuem substancialmente os custos com pedidos. No primeiro cenário o período de revisão do estoque de componentes é semanal, e por conta disso, as ordens de compra tendem a ocorrer semanalmente (não necessariamente toda semana pois podem haver semanas em que a posição de estoque seja maior que o nível de estoque almejado S). Por conta disso, os custos

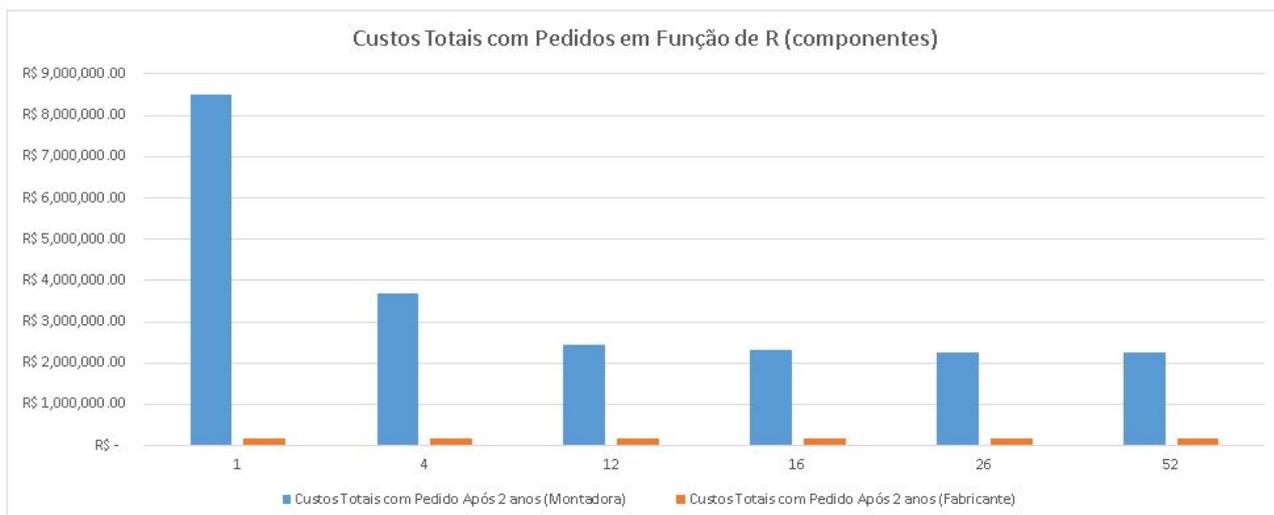
são estratosféricos (são gastos R\$8.500.050,00 com importação). De fato, quando olhamos para a experiência prática, raramente as firmas realizam importações semanalmente para o mesmo item. É válido definir períodos de revisões maiores trazendo lotes maiores, mesmo que isso gere um excesso de estoque. O importante é saber até que ponto vale a pena aumentar o nível S de estoque almejado sem penalizar em demasia os níveis de estoque e conseqüentemente os custos de sua manutenção. Da mesma forma, quem experimenta as reduções de custo com pedidos é apenas a montadora, que é quem arca com os custos de importação. Para a fabricante, nada muda, e os custos de pedido (transporte) se mantém na faixa dos R\$165.110,00 para todos os 6 cenários simulados, pelas mesmas razões elencadas no parágrafo anterior. Nesse caso, encontramos que o menor valor para os custos totais da cadeia após 2 anos de simulação entre os cenários testados se dá para $R = 16$ semanas, com um nível de estoque S de 1824 unidades. Isso significa que caso no momento da revisão a posição de estoque for menor que 1824 unidades, um pedido de $S - PE$ unidades é colocado para o fornecedor da cadeia. Nesse cenário, os custos totais da cadeia são de R\$3.738.326,46.

Figura 23 – Custos Totais de Manutenção dos Estoques em Função de $R_{componentes}$



Fonte: Autor (2020)

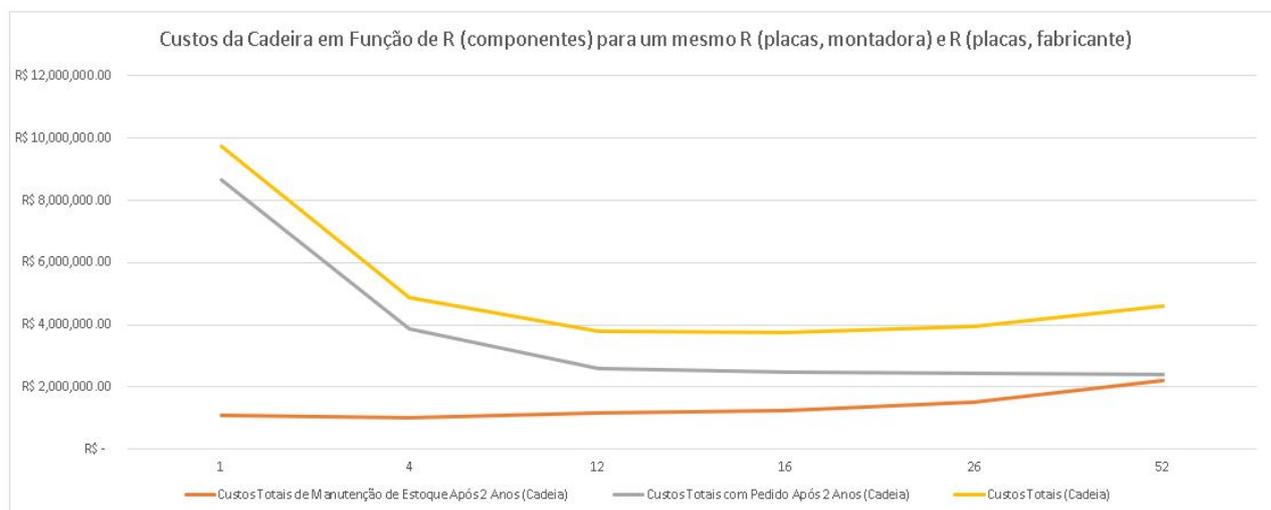
Figura 24 – Custos Totais com Pedidos em Função de $R_{componentes}$



Fonte: Autor (2020)

Temos na figura 26 os custos com manutenção de estoque, custos com pedidos e custos totais da cadeia em função do $R_{componentes}$ testados nos 6 primeiros cenários.

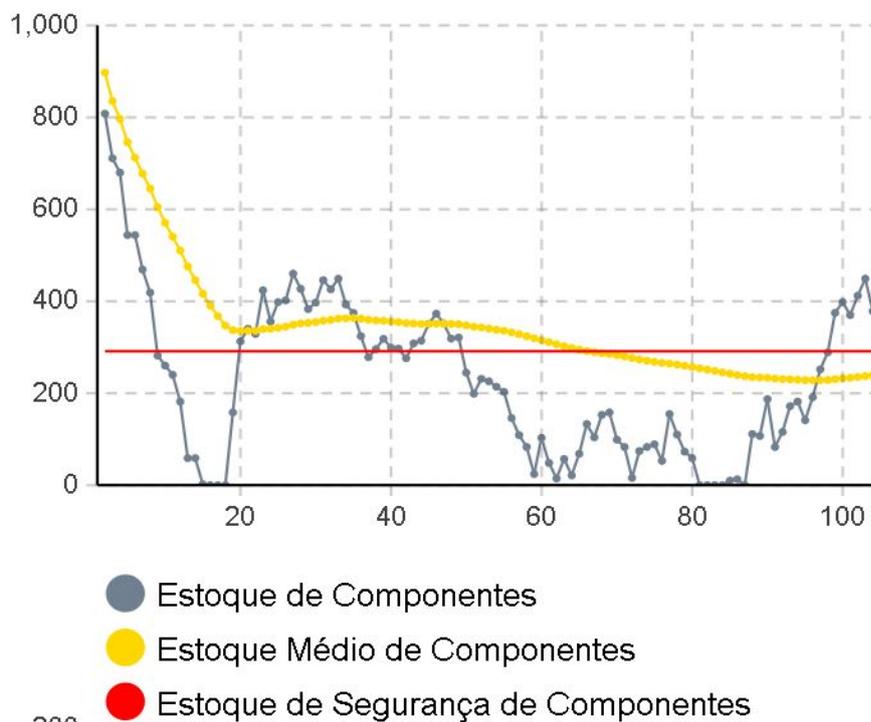
Figura 25 – Custos da Cadeia em Função de $R_{componentes}$



Fonte: Autor (2020)

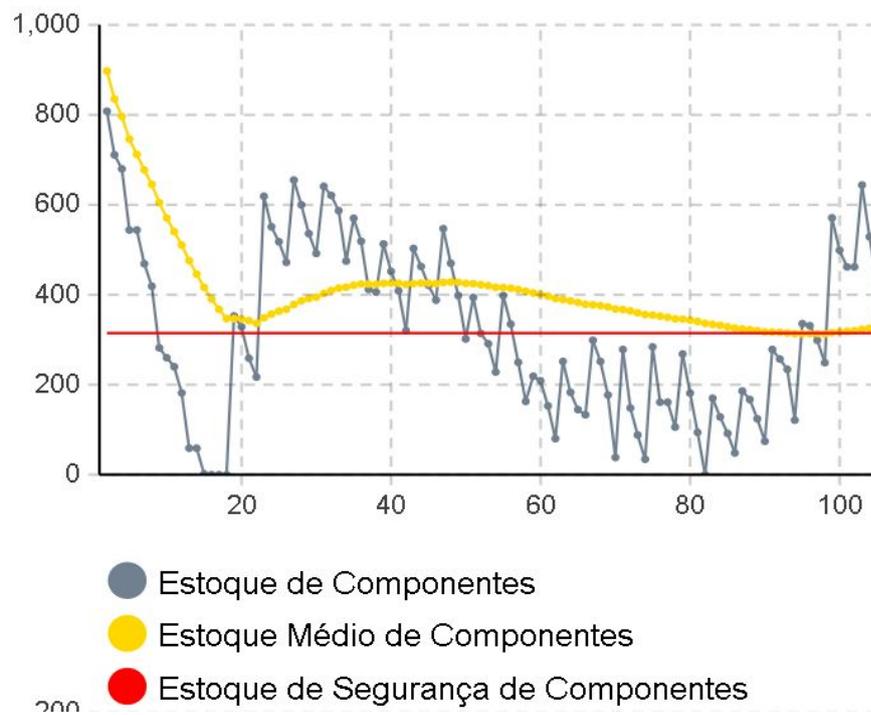
Nas figuras abaixo temos o comportamento dos estoques de componentes e dos componentes em importação ao longo da simulação para os cenário 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

Figura 26 – Estoque de Componentes no Cenário 1



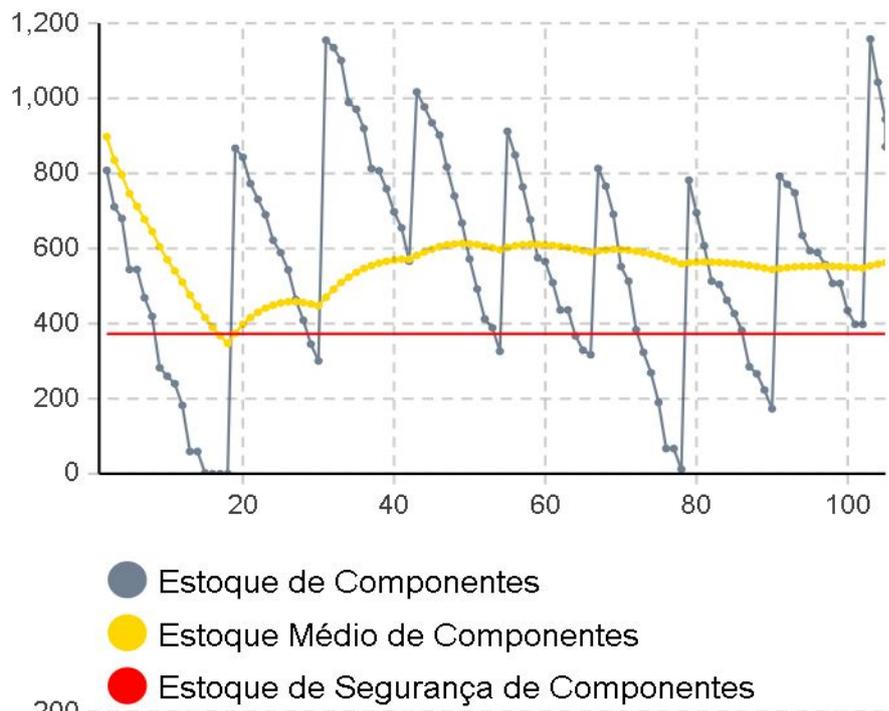
Fonte: Autor (2020)

Figura 27 – Estoque de Componentes no Cenário 2



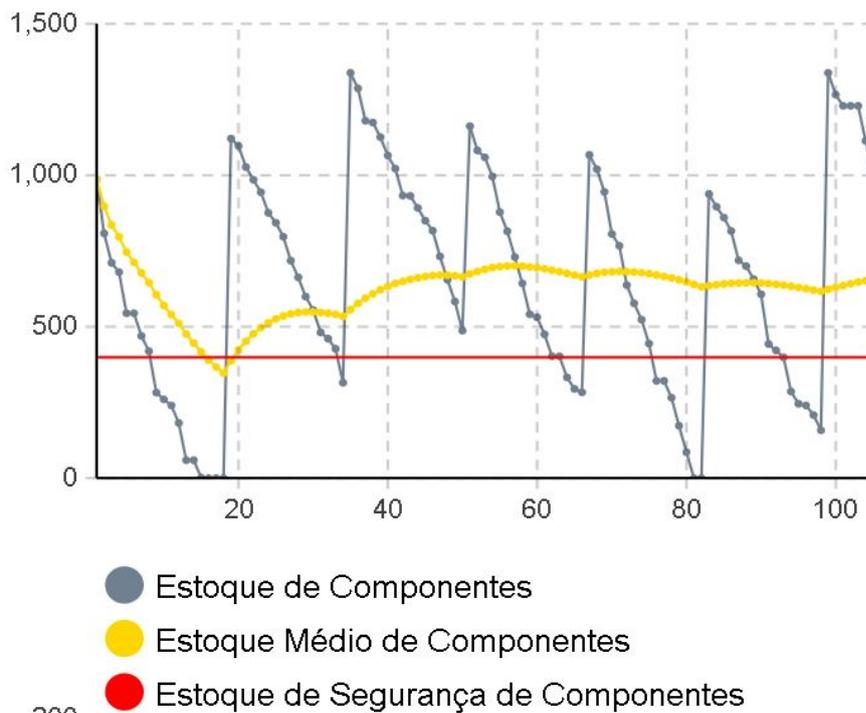
Fonte: Autor (2020)

Figura 28 – Estoque de Componentes no Cenário 3



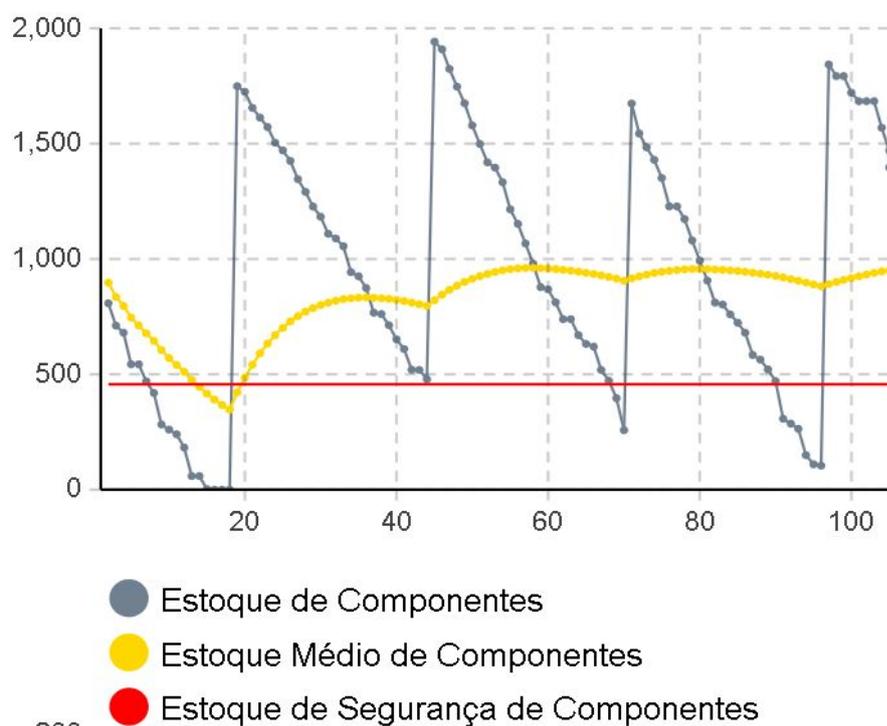
Fonte: Autor (2020)

Figura 29 – Estoque de Componentes no Cenário 4



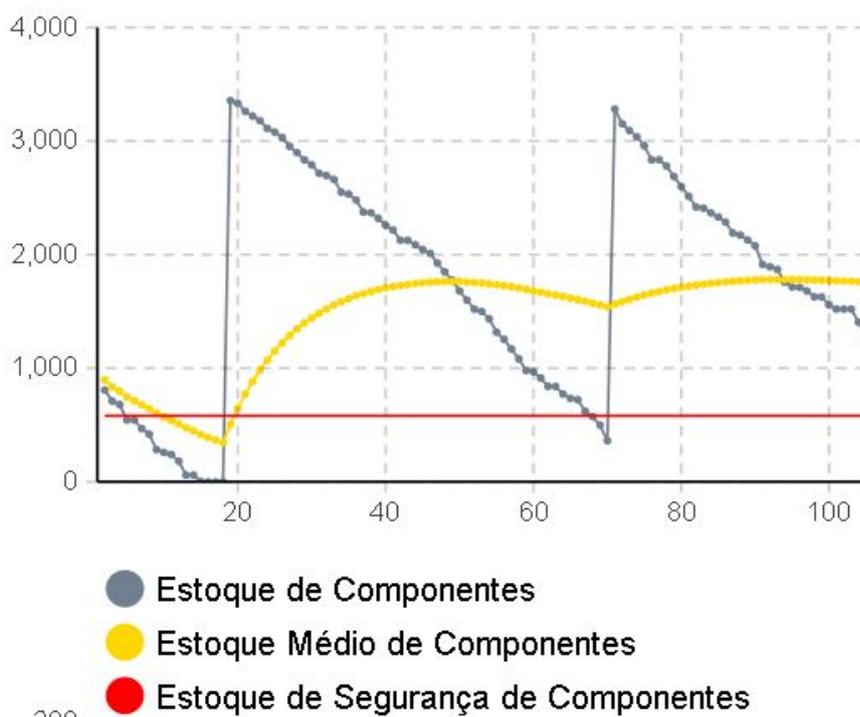
Fonte: Autor (2020)

Figura 30 – Estoque de Componentes no Cenário 5



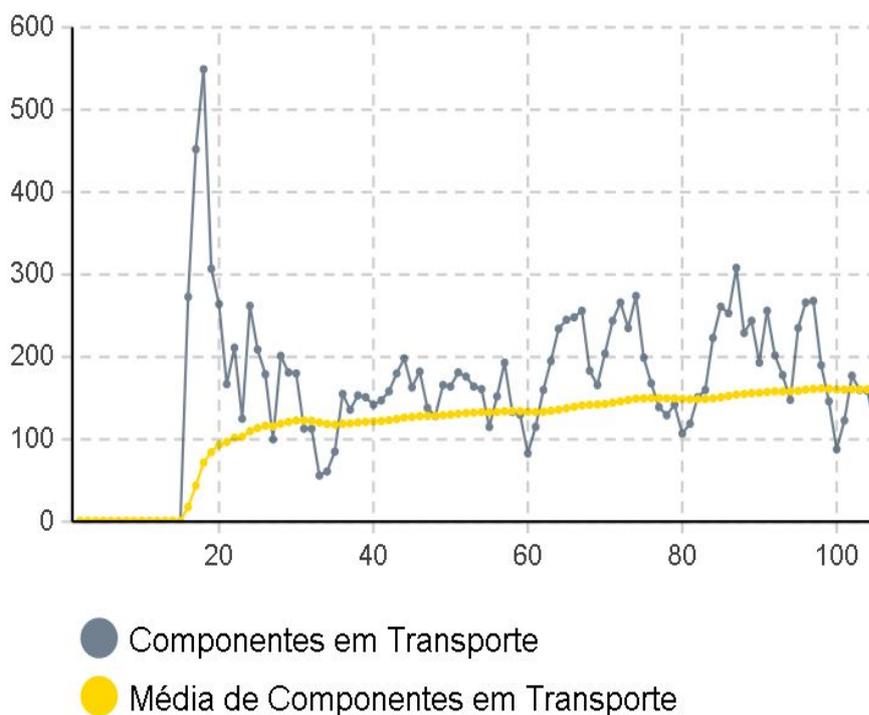
Fonte: Autor (2020)

Figura 31 – Estoque de Componentes no Cenário 6



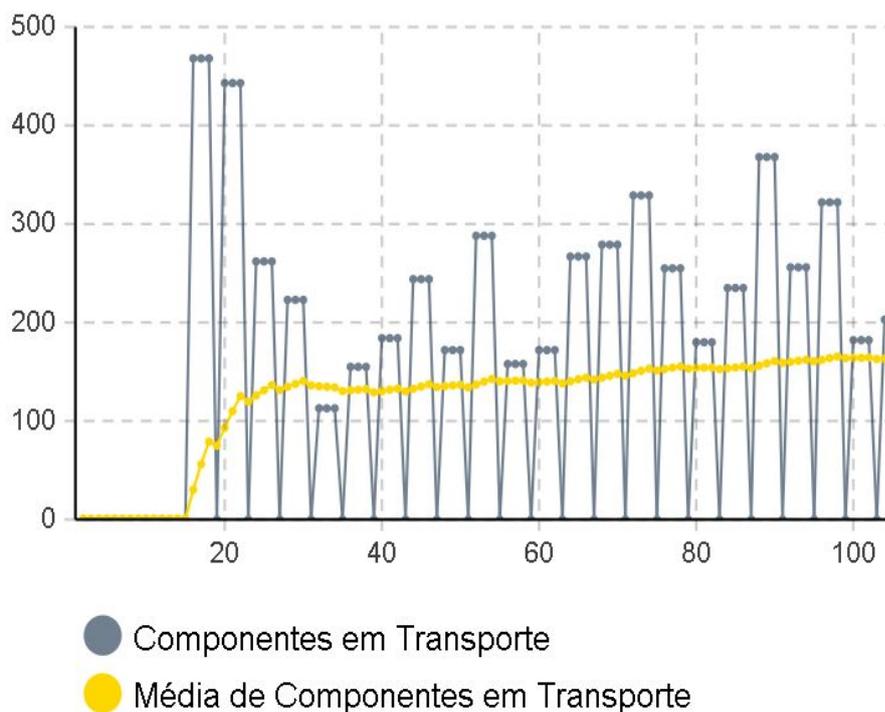
Fonte: Autor (2020)

Figura 32 – Estoque de Componentes em Importação/Transporte no Cenário 1



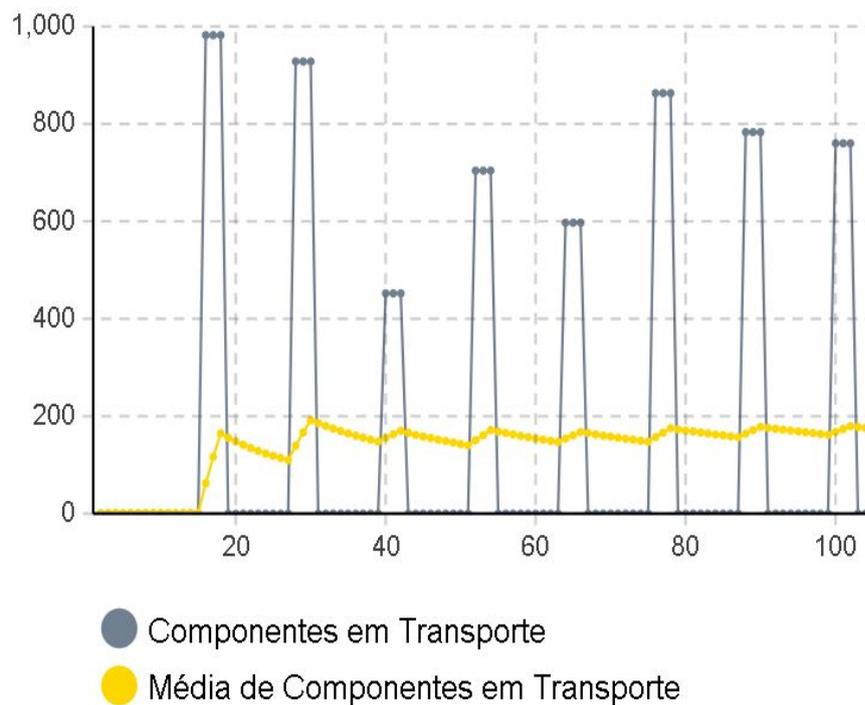
Fonte: Autor (2020)

Figura 33 – Estoque de Componentes em Importação/Transporte no Cenário 2



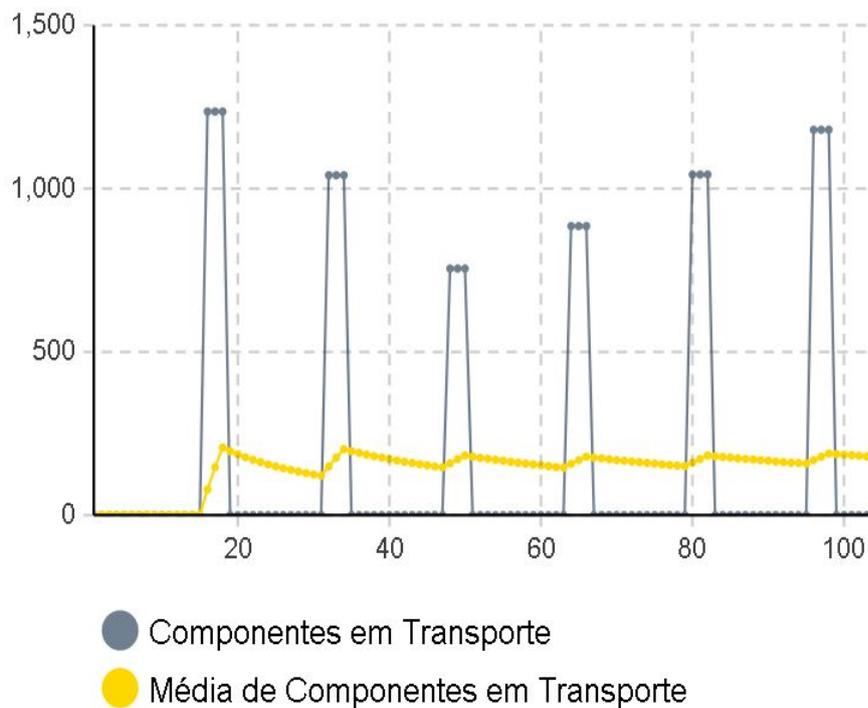
Fonte: Autor (2020)

Figura 34 – Estoque de Componentes em Importação/Transporte no Cenário 3



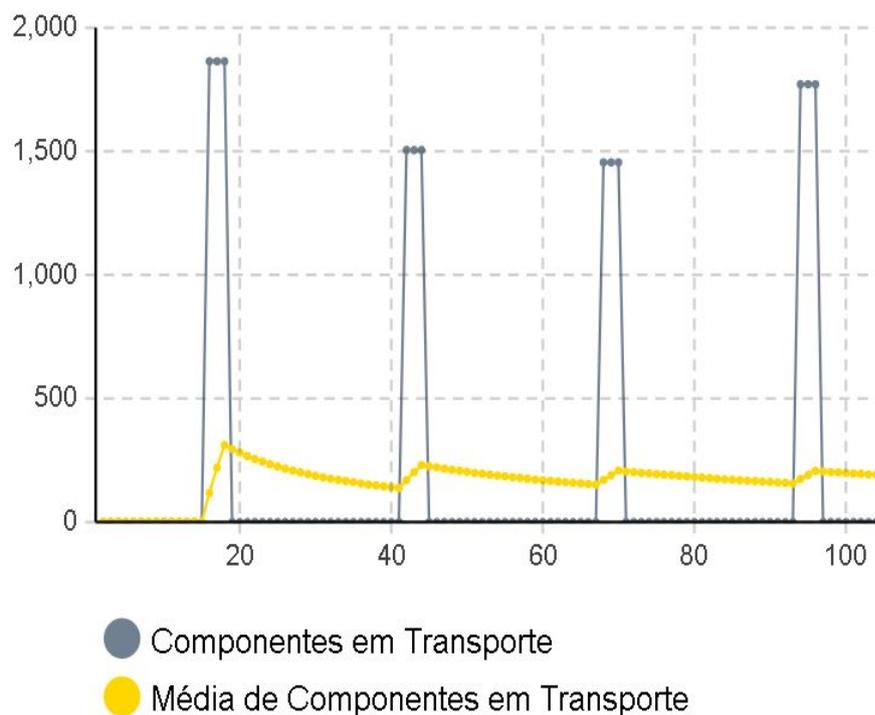
Fonte: Autor (2020)

Figura 35 – Estoque de Componentes em Importação/Transporte no Cenário 4



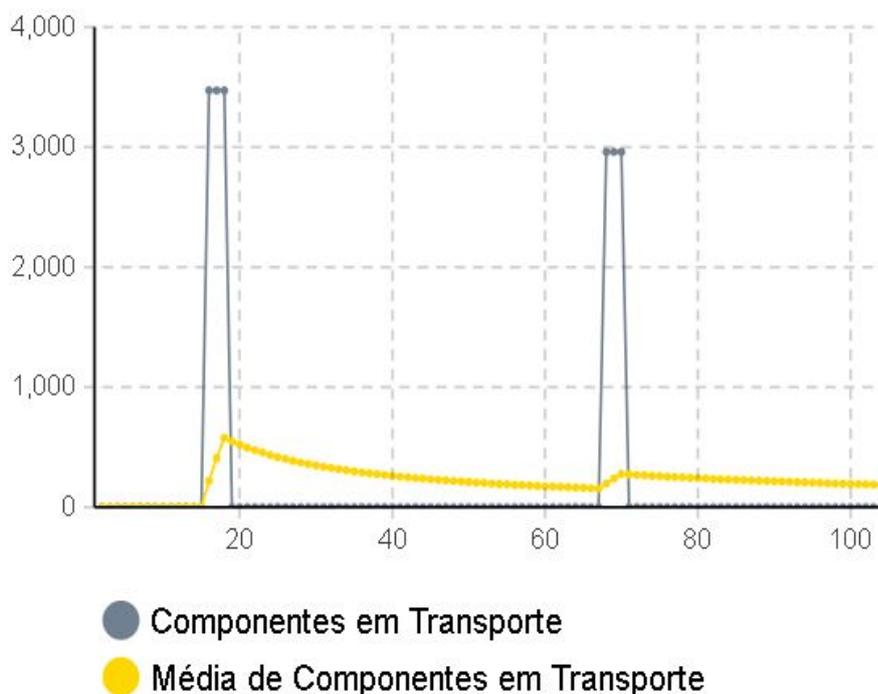
Fonte: Autor (2020)

Figura 36 – Estoque de Componentes em Importação/Transporte no Cenário 5



Fonte: Autor (2020)

Figura 37 – Estoque de Componentes em Importação/Transporte no Cenário 6

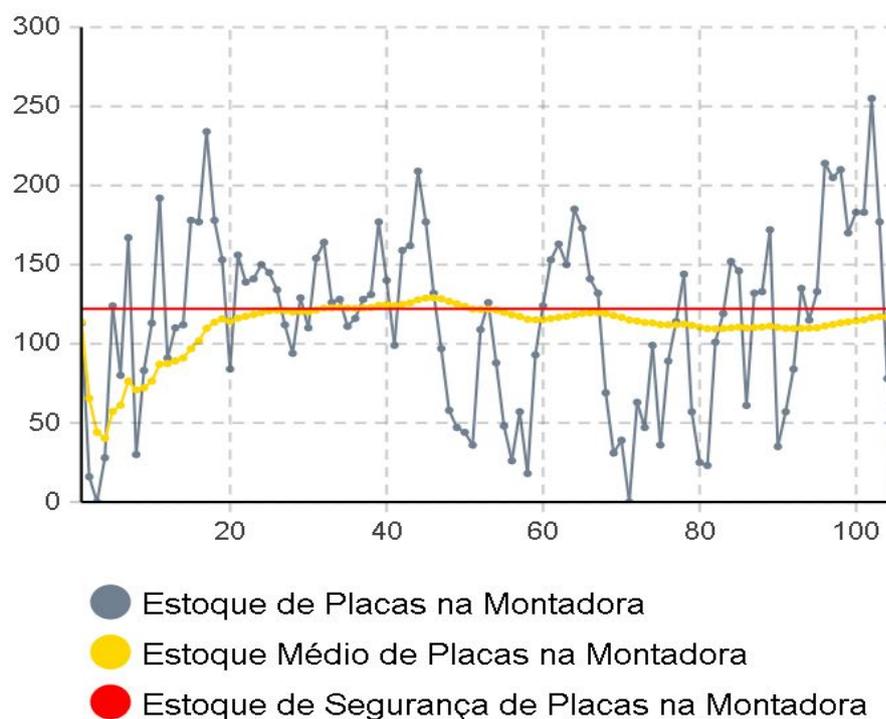


Fonte: Autor (2020)

Quando olhamos para os níveis de estoque de placas na montadora e os níveis

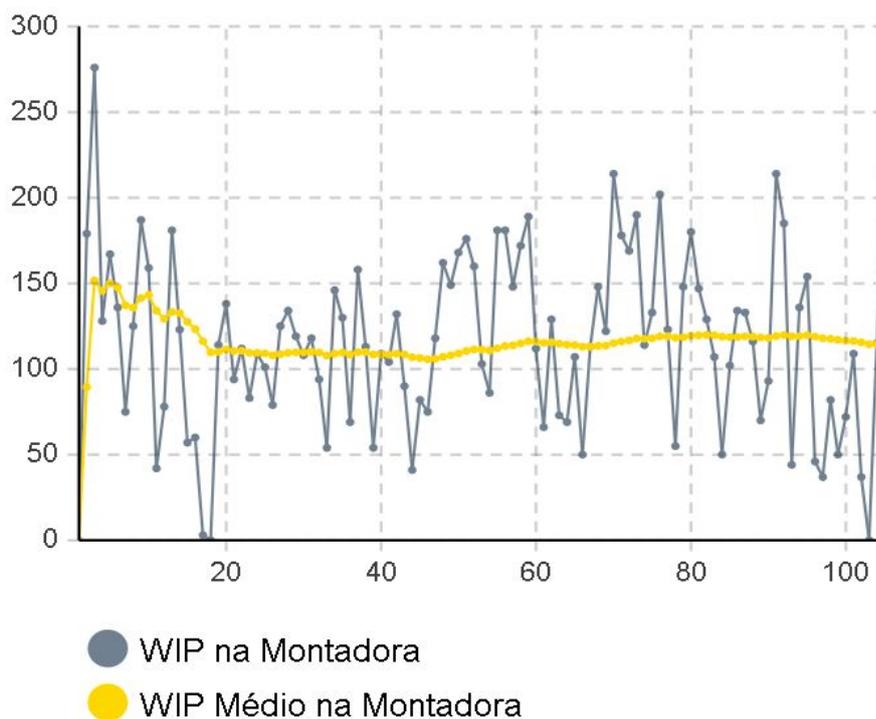
de WIP na montadora, veremos que o comportamento é exatamente o mesmo, assim como nos níveis de estoque da fabricante. Isso se dá pelos motivos elencados acima: a demanda das etapas à jusante se mantém a mesma e em nenhum dos 6 cenários testados há ruptura no fornecimento dos componentes. Como os padrões das ordens de compra do cliente final, das ordens de compra da fabricante e das ordens de produção da montadora se mantêm o mesmo, os níveis de estoque e WIP também se mantêm.

Figura 38 – Estoque de Placas na Montadora - Cenários 1, 2, 3, 4, 5 e 6



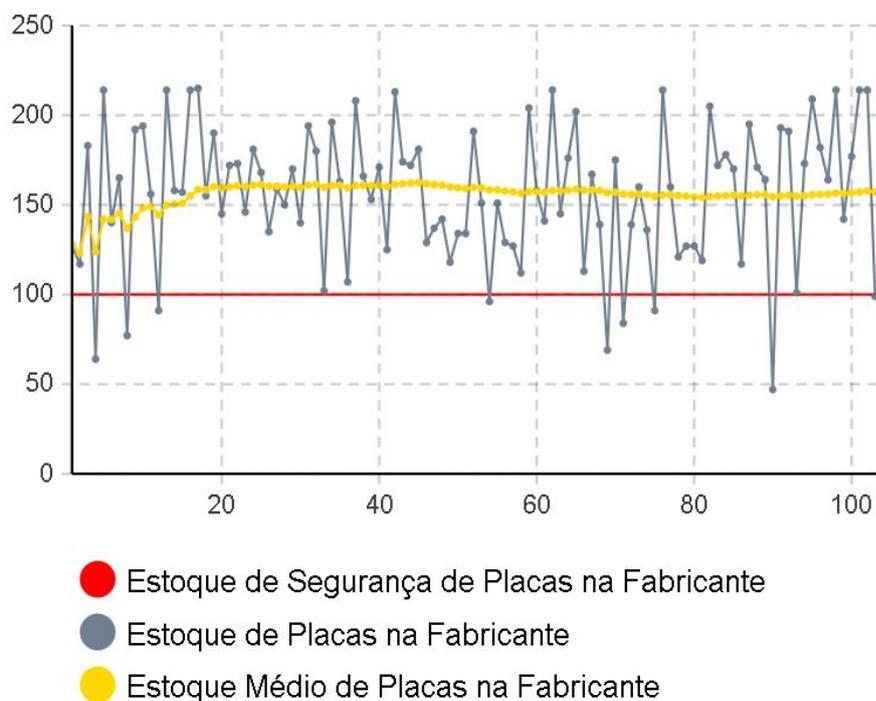
Fonte: Autor (2020)

Figura 39 – WIP na Montadora - Cenários 1, 2, 3, 4, 5 e 6



Fonte: Autor (2020)

Figura 40 – Estoque de Placas na Fabricante - Cenários 1, 2, 3, 4, 5 e 6

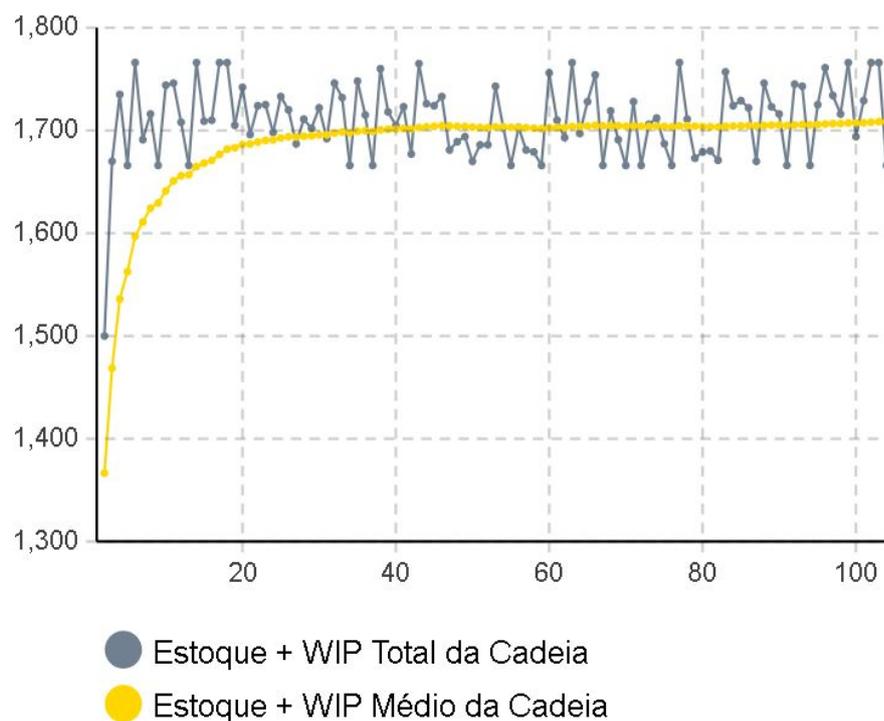


Fonte: Autor (2020)

Na figura 41 temos o estoque + WIP total da cadeia ao longo dos 2 anos de

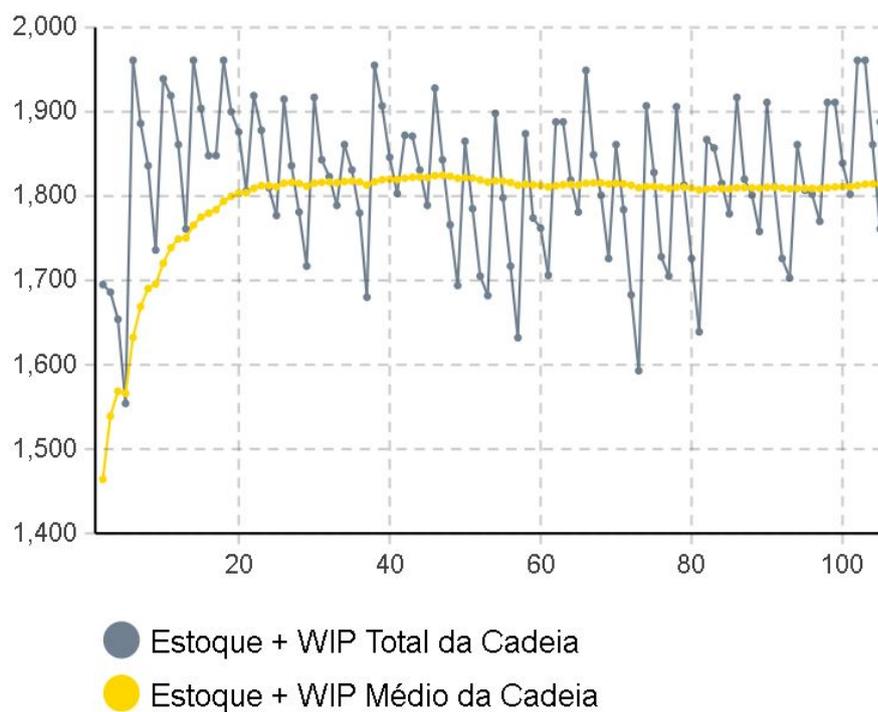
simulação. Fica claro que o que faz com que os níveis de estoque da cadeia aumentem à cada cenário analisado são justamente o aumento nos períodos de revisão para compra de componentes. Note que o comportamento do estoque total da cadeia em cada cenário se assemelha muito com o comportamento do estoque de componentes em cada cenário.

Figura 41 – Estoque + WIP Total da Cadeia - Cenário 1



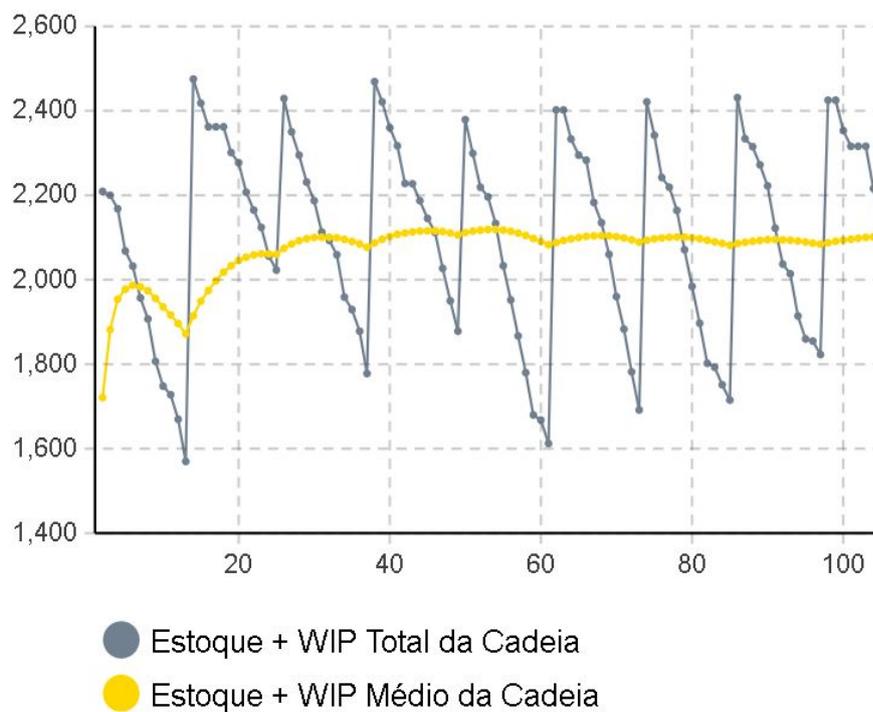
Fonte: Autor (2020)

Figura 42 – Estoque + WIP Total da Cadeia - Cenário 2



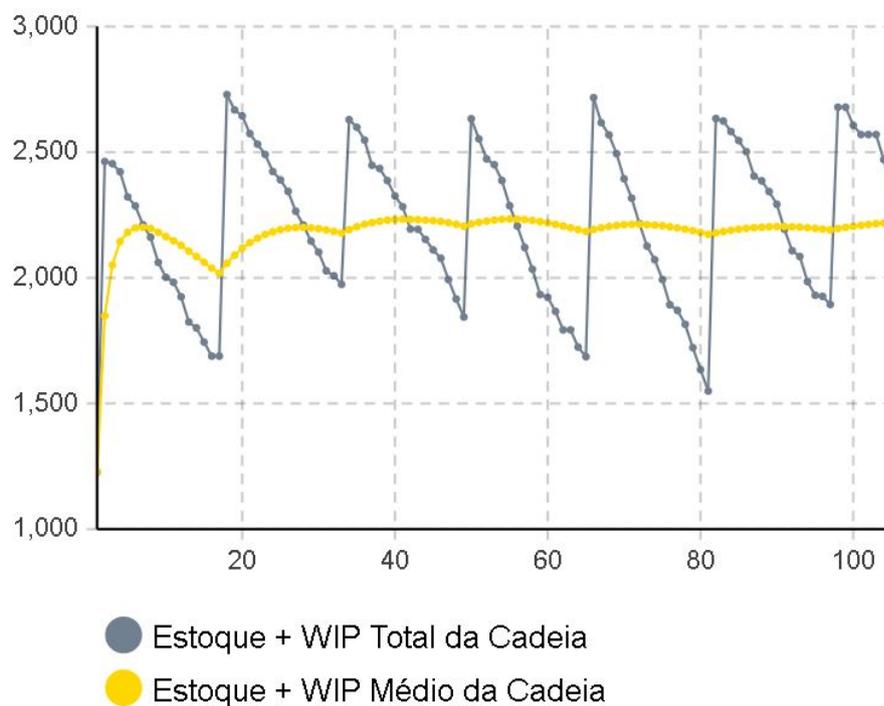
Fonte: Autor (2020)

Figura 43 – Estoque + WIP Total da Cadeia - Cenário 3



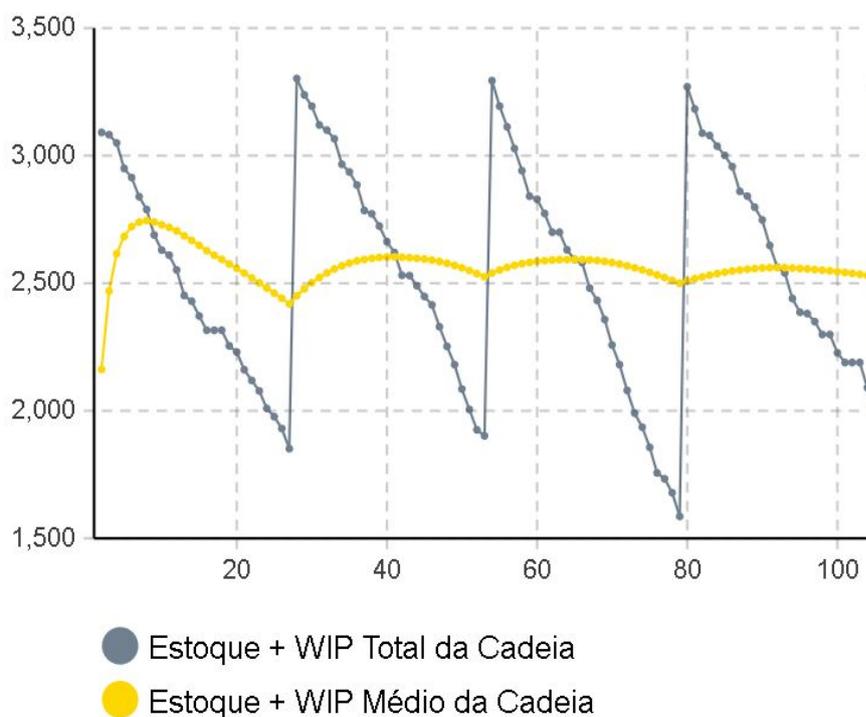
Fonte: Autor (2020)

Figura 44 – Estoque + WIP Total da Cadeia - Cenário 4



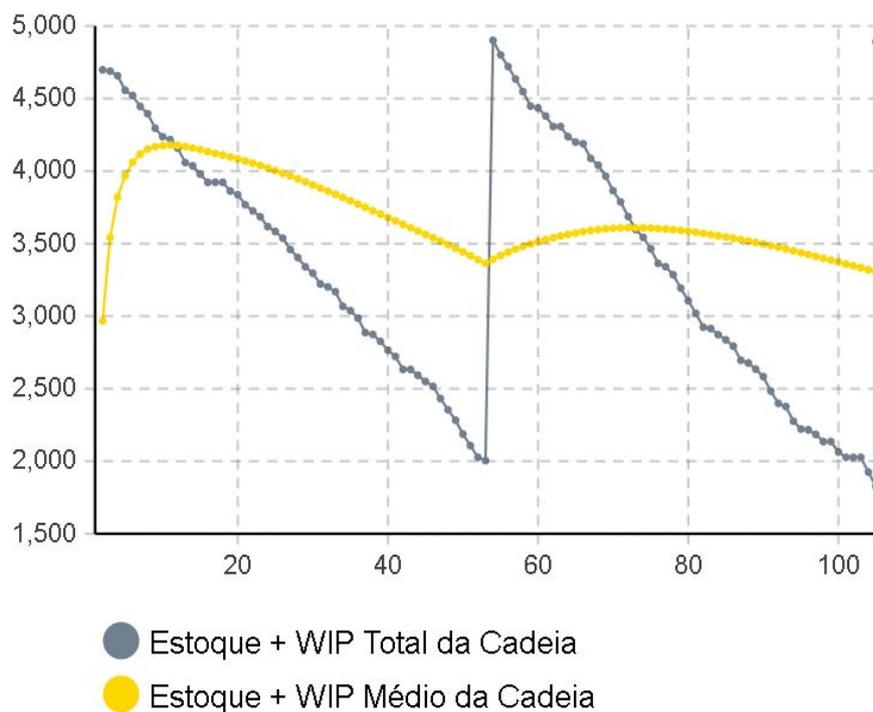
Fonte: Autor (2020)

Figura 45 – Estoque + WIP Total da Cadeia - Cenário 5



Fonte: Autor (2020)

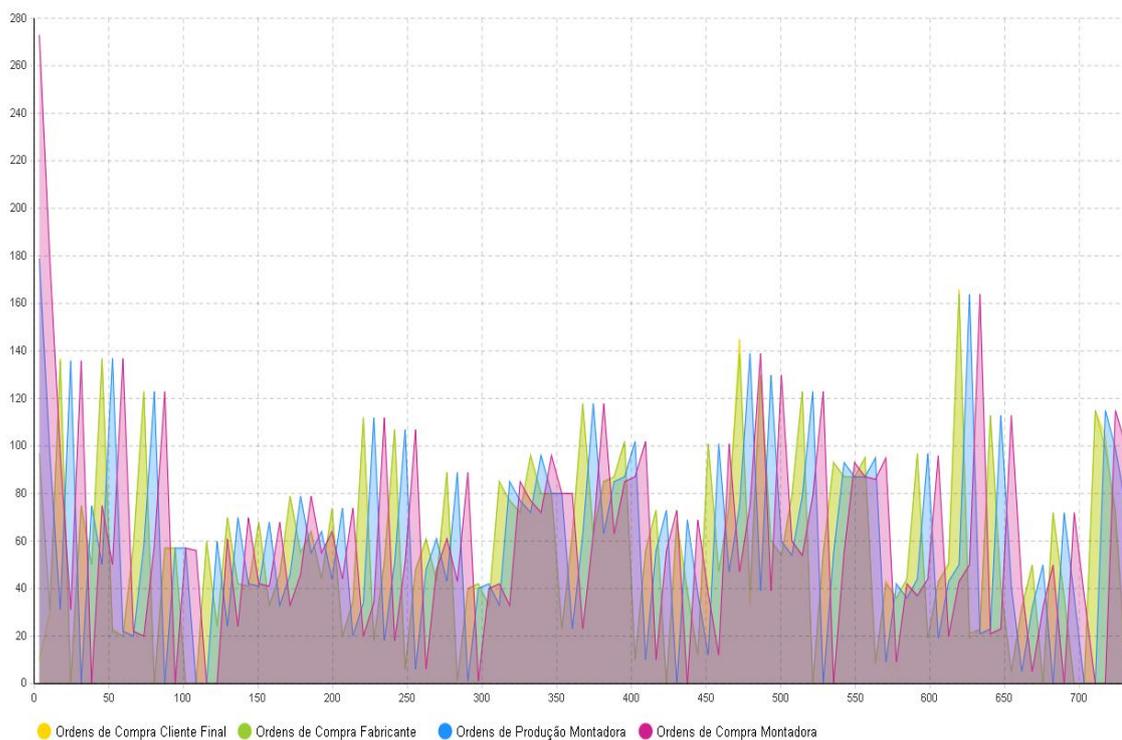
Figura 46 – Estoque + WIP Total da Cadeia - Cenário 6



Fonte: Autor (2020)

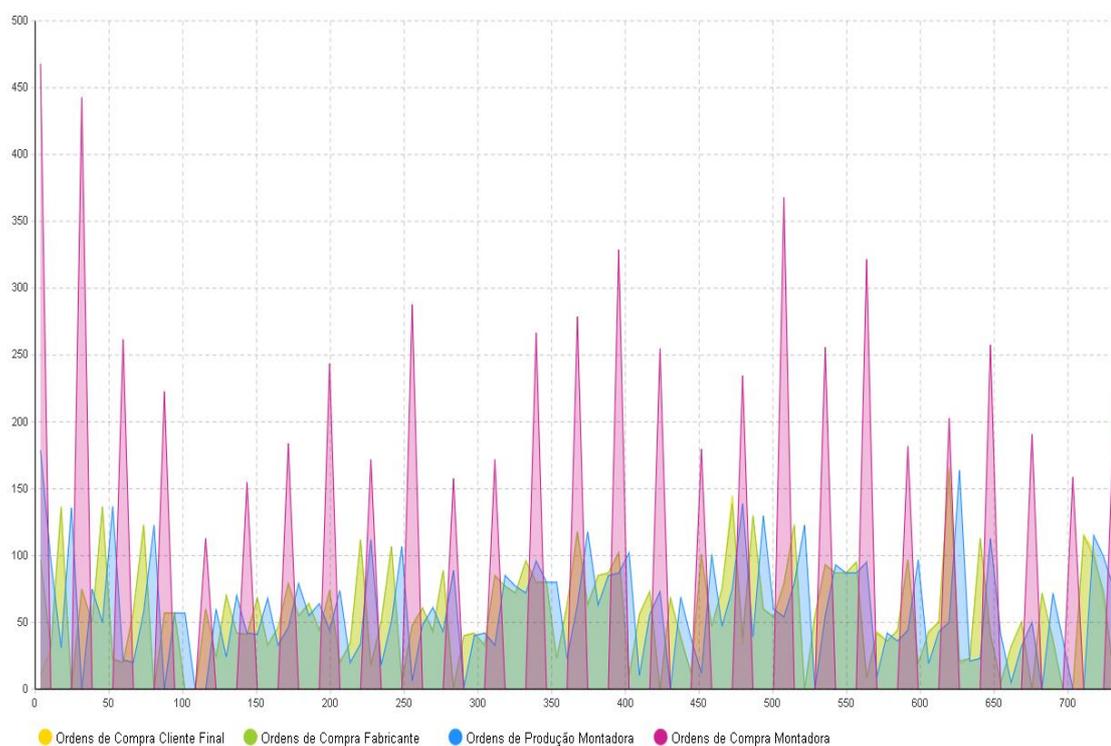
Quando olhamos para o comportamento dos pedidos em cada cenário, vemos que a variabilidade aumenta conforme aumentam os períodos de revisão, o que é trivial pois o número de pedidos diminui conforme os períodos entre revisões aumentam.

Figura 47 – Efeito Chicote - Cenário 1



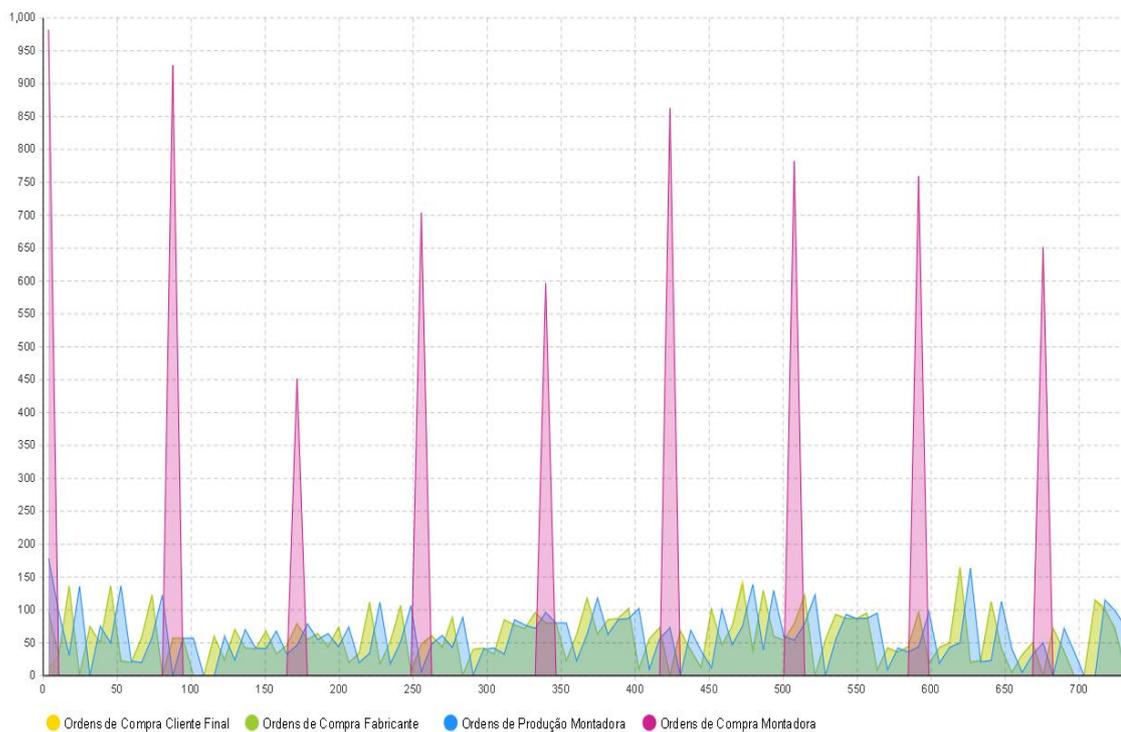
Fonte: Autor (2020)

Figura 48 – Efeito Chicote - Cenário 2



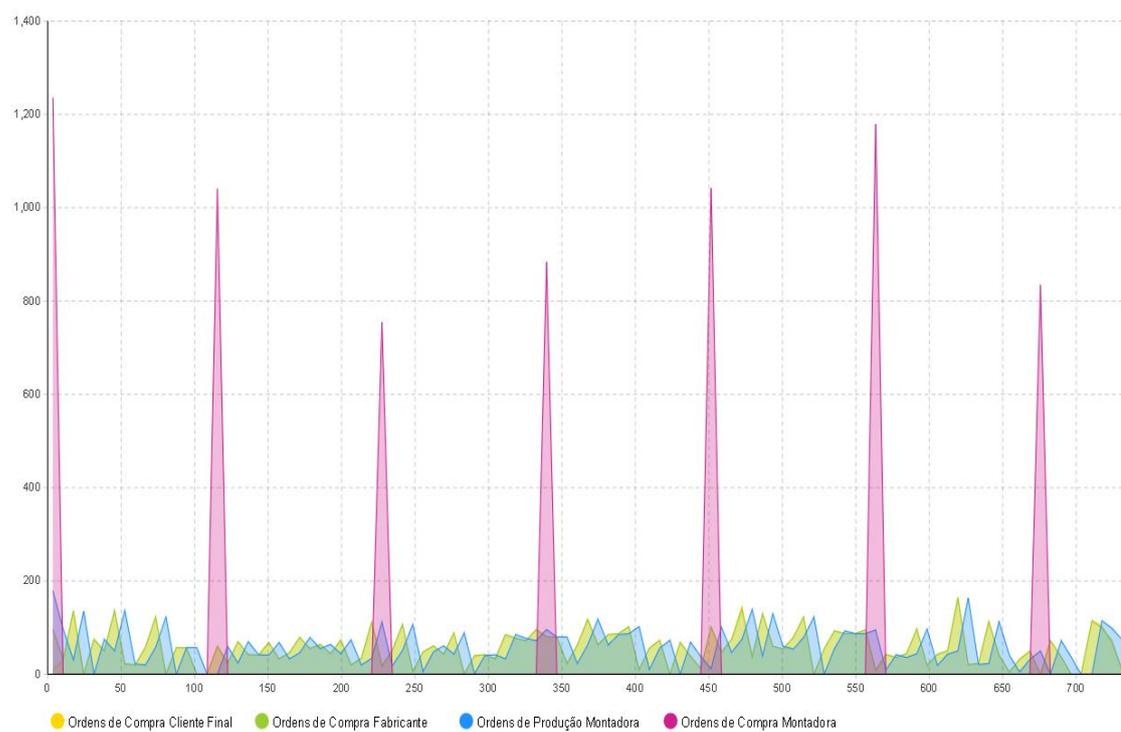
Fonte: Autor (2020)

Figura 49 – Efeito Chicote - Cenário 3



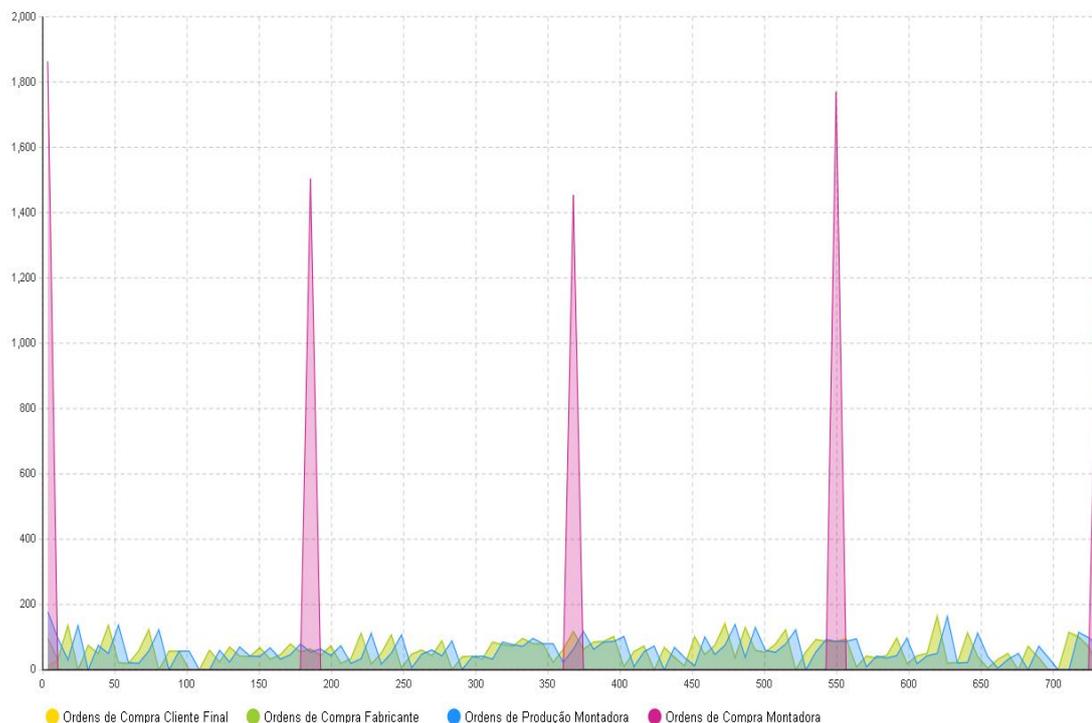
Fonte: Autor (2020)

Figura 50 – Efeito Chicote - Cenário 4



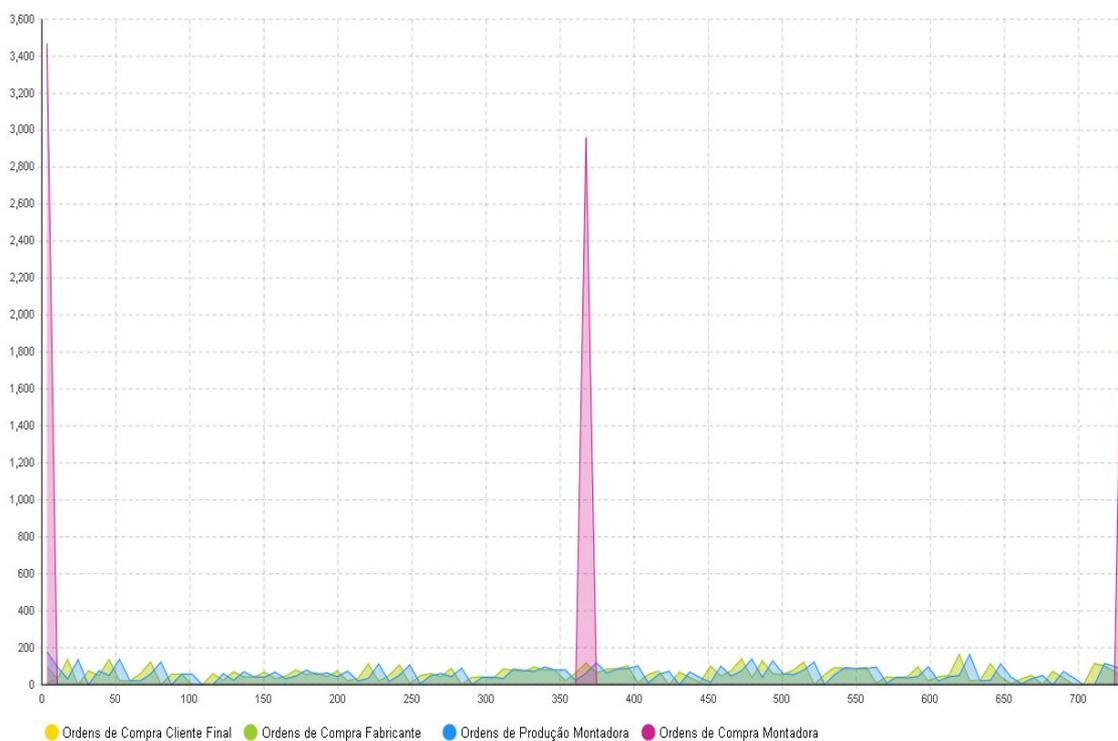
Fonte: Autor (2020)

Figura 51 – Efeito Chicote - Cenário 5



Fonte: Autor (2020)

Figura 52 – Efeito Chicote - Cenário 6



Fonte: Autor (2020)

Não só a variabilidade aumenta mas também a média dos pedidos tende a aumentar levemente conforme os períodos entre revisões aumentam. Isso se dá pois os estoques de segurança aumentam com os pedidos entre revisões (lembre-se que o estoque de segurança é função também dos pedidos entre revisões) o que diminui a posição de estoque (que é função do estoque de segurança). É por isso que a quantidade total de ordens aumenta com o aumento entre os períodos entre revisões.

Tabela 27 – Métricas de Pedidos e Efeito Chicote - Primeiros 6 Cenários

Métrica	C1	C2	C3	C4	C5	C6
$(Q_{total,cliente})$	6011	6011	6011	6011	6011	6011
$(Q_{total,oc,fab.})$	6011	6011	6011	6011	6011	6011
$(Q_{total,op,mon.})$	6185	6185	6185	6185	6185	6185
$(Q_{total,oc,mon.})$	6385	6580	6721	6975	7976	9583
$(CV_{oc,cliente})$	67,78%	67,78%	67,78%	67,78%	67,78%	67,78%
$(CV_{oc,fabricante})$	66,29%	66,29%	66,29%	66,29%	66,29%	66,29%
$(CV_{op,montadora})$	66,91%	66,91%	66,91%	66,91%	66,91%	66,91%
$(CV_{oc,montadora})$	73,29%	183,93%	336,50%	381,48%	452,62%	587,20%

Fonte: Autor (2020)

Tabela 28 – Custos Totais da Cadeia - Primeiros 6 Cenários

Cenário	Custo Total da Cadeia
C1	R\$9.732.378,55
C2	R\$4.854.294,61
C3	R\$3.782.236,20
C4	R\$3.738.326,46
C5	R\$3.939.321,00
C6	R\$4.603.293,92

Fonte: Autor (2020)

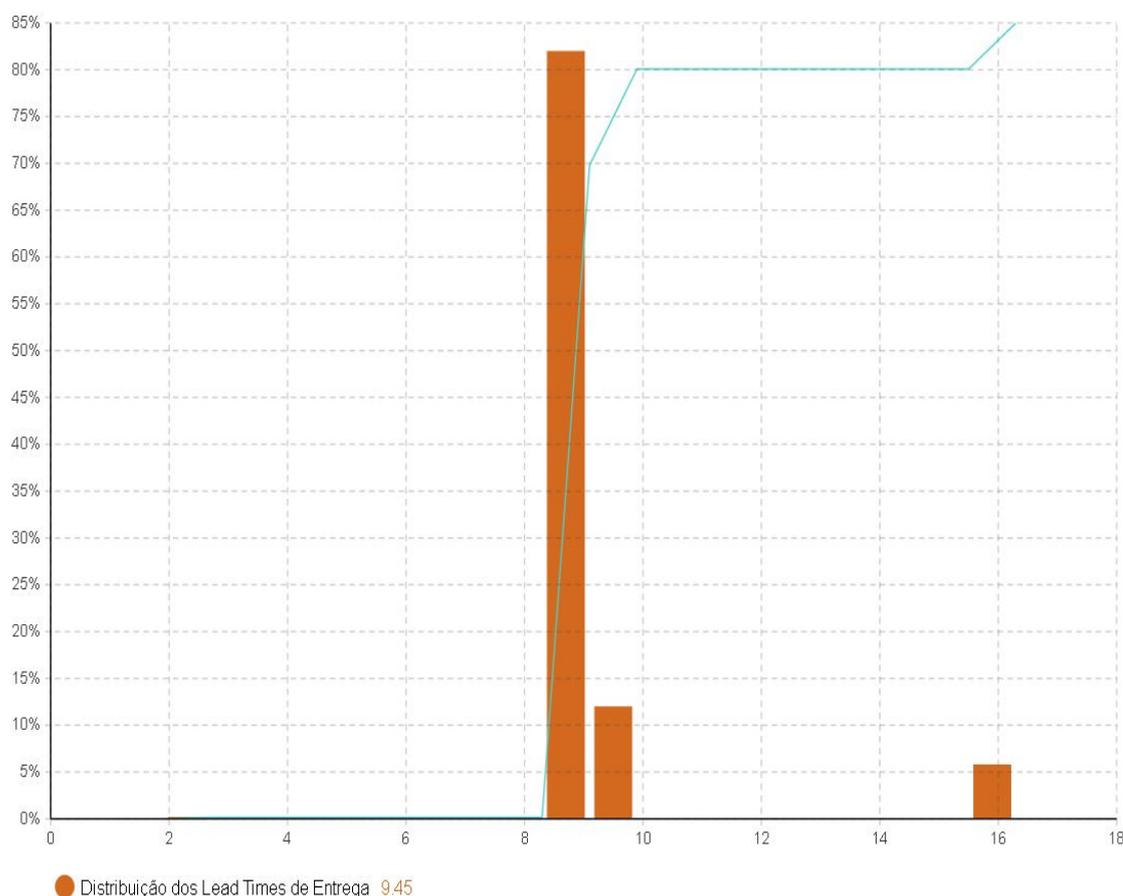
Temos portanto, que a melhor estratégia para a compra de componentes se dá no cenário 4 com $R_{componentes} = 16$ semanas e $S_{componentes} = 1824$, gerando um custo total para a cadeia de R\$3.738.326,46

5.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS CENÁRIOS 7, 8, 9 E 10

Após termos definido a melhor política de estoque para a compra de componentes prosseguimos aqui com os resultados para o procedimento de escolha da melhor política (R, S) para a produção de placas.

No que tange ao abastecimento, veremos que nos 4 cenários a distribuição dos lead times de entrega é a mesma (exatamente a mesma que nos 6 cenários anteriores também), com média de 9,45 dias.

Figura 53 – Distribuição dos lead times de entrega nos cenários 7, 8, 9 e 10



Fonte: Autor (2020)

A tabela 29 traz os dados de abastecimento para os 4 cenários simulados.

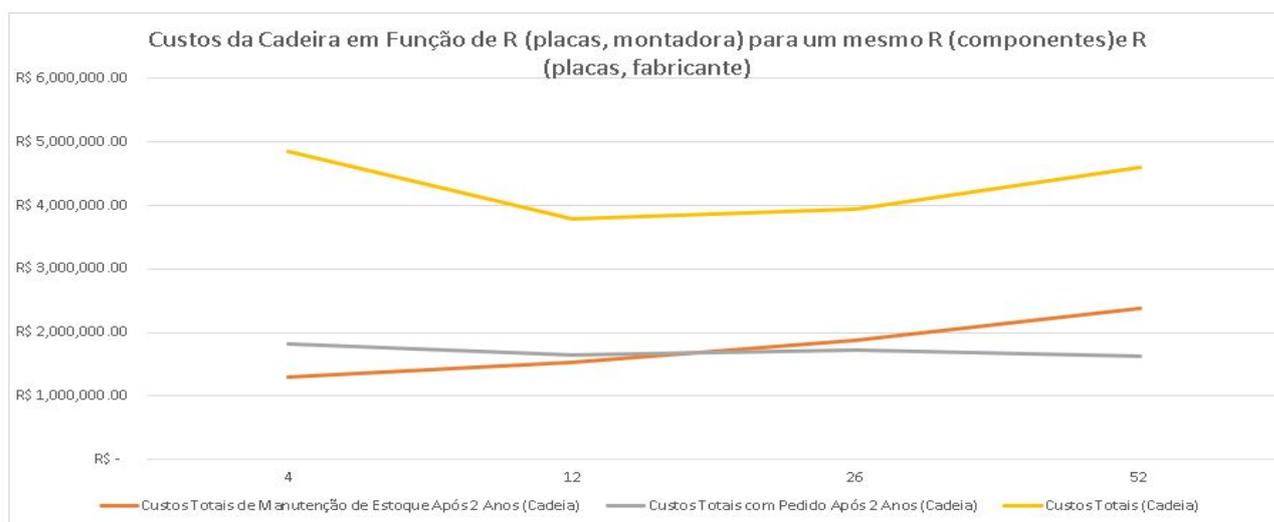
Tabela 29 – Métricas de Abastecimento - Cenários 7, 8, 9 e 10

Total de Pedidos Recebidos	6011
Total de Pedidos Entregues	5924
Taxa de Abastecimento	98,55%
Total Pedidos em Produção + Fila	87
Taxa de Disponibilidade	100%
LT Médio de Entrega para o Cliente Final	9,45
Dias Estoque da Fabricante Desabastecido	0

Fonte: Autor (2020)

Mesmo que em todos os cenários as métricas para o abastecimento sejam as mesmas, os custos irão variar em cada um dos 4 cenários simulados, conforme o esperado. É de esperar que os custos totais de manutenção de estoque após 2 anos de simulação aumentem conforme os períodos entre revisão aumentam. Essa é a expectativa dado que os lotes de produção aumentam com o aumento dos períodos entre revisões; dessa forma estoques que estariam na forma de componentes agora estarão na forma de placas, que tem maior valor agregado (os custos de produção estarão diluídos no valor da placa). Isso significa que impreterivelmente os custos com estoque serão maiores pois é impossível que as placas tenham um custo menor que os componentes. Da mesma forma que nos 6 primeiros cenários, esse aumento de custos nos estoques onera apenas a montadora, que é quem detém a posse das placas montadas. De fato aqui a decisão consiste em diminuir os custos com produção em troca de aumentar os custos com estoque (que antes estariam na forma de componentes e agora estarão na forma de placas montadas). No entanto, o valor com os quais essas placas serão avaliadas no estoque vai depender justamente da estratégia de produção da montadora (que pode ser uma estratégia mais cara, e portanto, que aumentará o valor unitário com que as placas serão avaliadas no estoque). Por outro lado, a expectativa é que os custos com pedidos diminuam com o aumento dos períodos entre revisões pois agora os lotes de produção serão maiores e menos frequentes, portanto os custos fixos com produção serão menores. Na figura 54 temos os custos totais para esses 4 cenários analisados:

Figura 54 – Custos da Cadeia em Função de $R_{placas, montadora}$

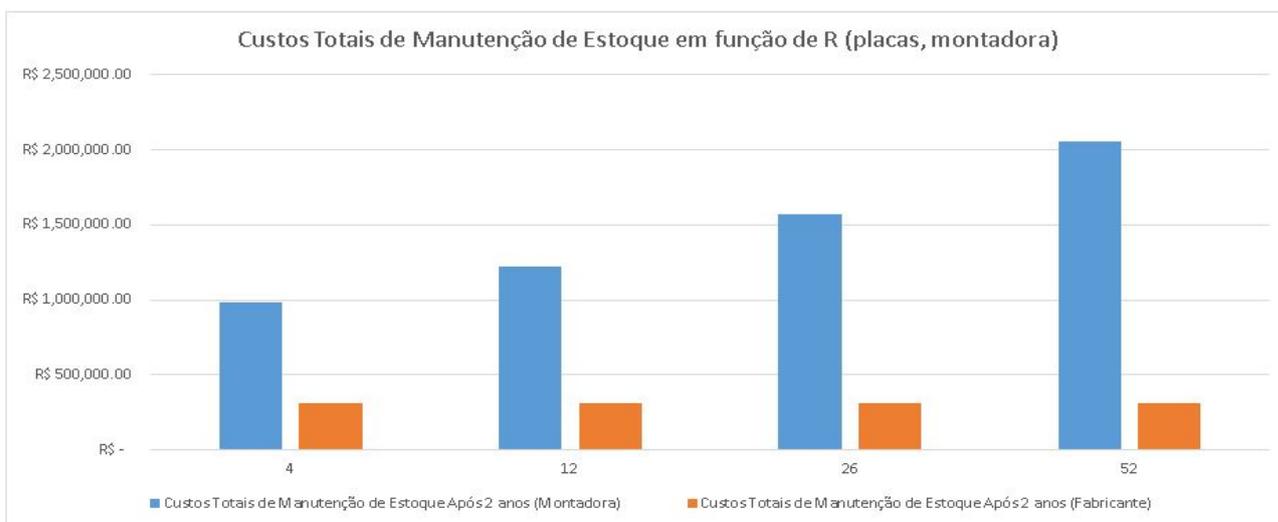


Fonte: Autor (2020)

De fato, assim como na análise comparativa entre os cenários 1, 2, 3, 4, 5 e 6 realizada na seção anterior, nada muda para a fabricante. Como não há nenhuma ruptura no abastecimento para a fabricante e não há nenhuma mudança no padrão da

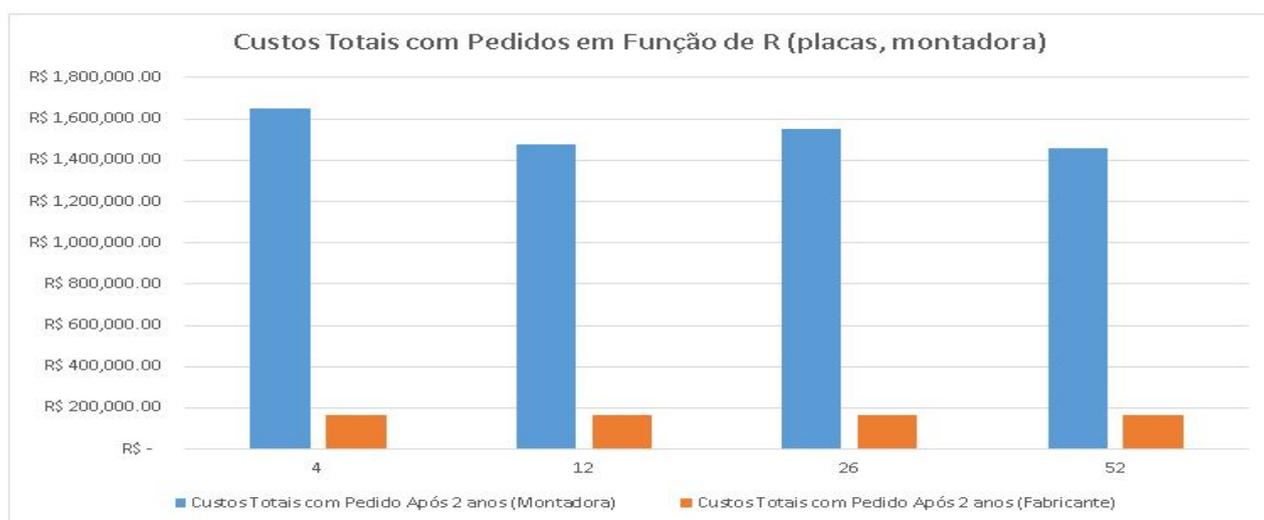
demanda nos cenários, não existem alterações na oferta ou na demanda que façam com que a fabricante apresente diferenças nos seus níveis de estoque e consequentemente nos seus custos de manutenção. Por conta disso, os custos de manutenção para a fabricante se mantém estáveis na casa dos R\$307.562,03 em todos os 4 cenários. Os custos com pedidos também se mantêm os mesmos, na casa dos R\$165.110,00, dado que a política de estoque da fabricante se mantém a mesma em todos os cenários.

Figura 55 – Custos Totais com Man. dos Estoques em Função de $R_{placas,montadora}$



Fonte: Autor (2020)

Figura 56 – Custos Totais com Pedidos em Função de $R_{placas,montadora}$

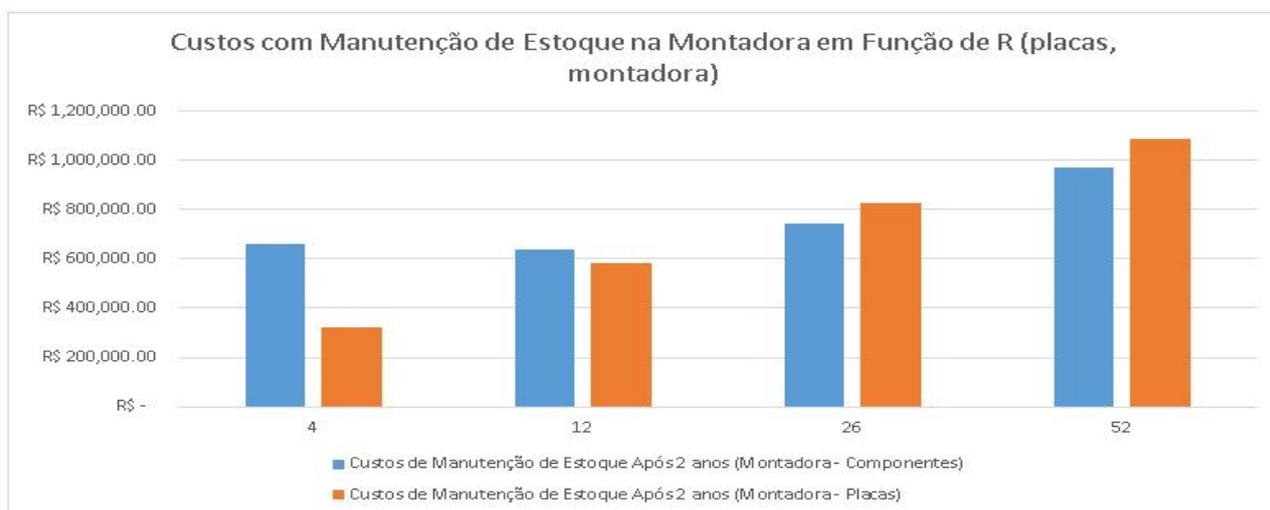


Fonte: Autor (2020)

No entanto, quando destrinchamos melhor os custos manutenção dos estoques na montadora, vemos que o aumento nos custos com manutenção dos estoques são

bastante expressivos, o que é de certa forma estranho se pensarmos que a montadora apenas estaria trocando um estoque que estaria na forma de componentes para um estoque na forma de placas. Quando olhamos os custos de manutenção dos estoques em cada cenário, vemos que tanto os custos de manutenção do estoque das placas quanto dos componentes aumentam conforme o período entre revisões $R_{placas,montadora}$ aumenta. Isso se dá pois com período entre revisões maiores, os lotes de produção são maiores, logo os pedidos da produção para o estoque de componentes aumentam também. Lembre-se que o tamanho dos lotes de compra depende da posição de estoque, que por sua vez depende da quantidade de pedidos em aberto que o estoque tem com a etapa à jusante. Quando a produção de placas exige uma enorme quantidade de componentes para produzir lotes de produção que são cada vez maiores, o estoque de componentes precisa estar grande o suficiente para atender à esses grandes lotes produtivos. Em outras palavras, quando os lotes aumentam eles acabam naturalmente por "puxar" um aumento nos lotes nas etapas à montante da cadeia. Isso faz com que os estoques médios não apenas das placas, mas também dos componentes, aumentem. Conseqüentemente, temos um maior aumento nos custos de manutenção dos estoques.

Figura 57 – Custos com Man. de Estoques na Montadora em Função de $R_{placas,montadora}$

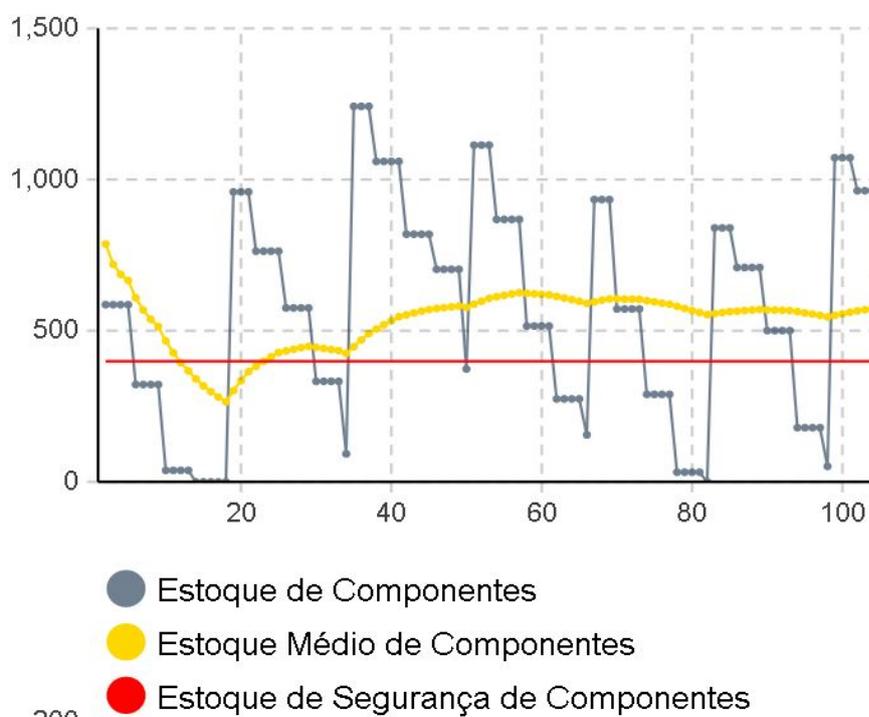


Fonte: Autor (2020)

Esse fenômeno é visível a partir dos cenários 9 e 10, em que o $R_{placas,montadora}$ se torna maior que o $R_{componentes}$, que é justamente quando os $Q_{prod.}$ aumentam bruscamente. No cenário 7, o estoque médio de componentes é de aproximadamente 577 unidades, no cenário 8 é de aproximadamente 544 unidades. No cenário 9, 634 e no cenário 10, que é quando $R_{placas,montadora} = 52$ semanas, o estoque médio de componentes chega a aproximadamente 900 unidades. É possível perceber o aumento brusco dos níveis de estoque de componentes e de placas na fabricante nos últimos

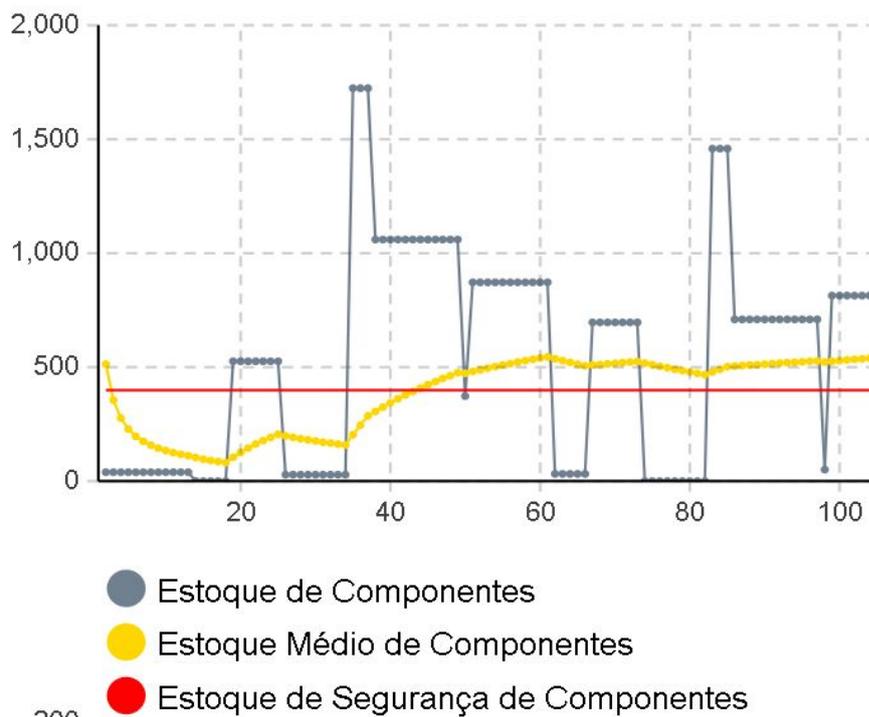
dois cenários através do gráfico que representa o comportamento desses estoques ao longo da simulação.

Figura 58 – Estoque de Componentes - Cenário 7



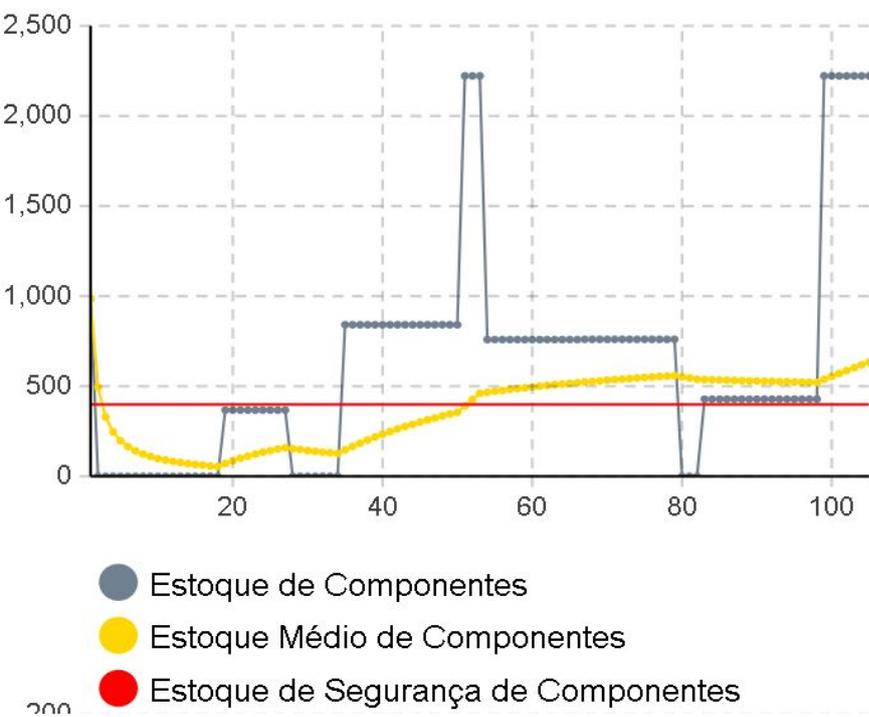
Fonte: Autor (2020)

Figura 59 – Estoque de Componentes - Cenário 8



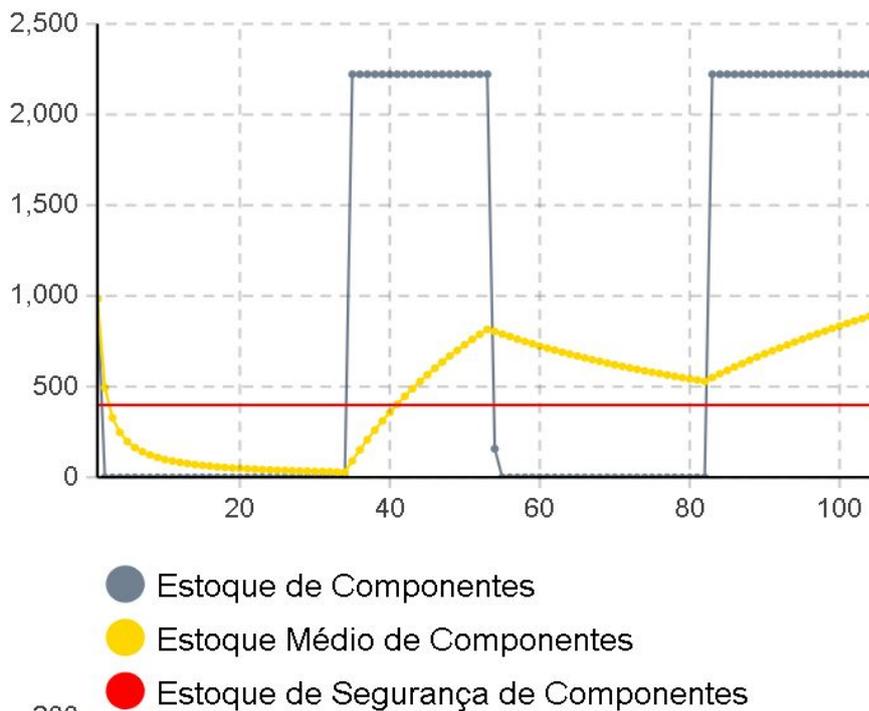
Fonte: Autor (2020)

Figura 60 – Estoque de Componentes - Cenário 9



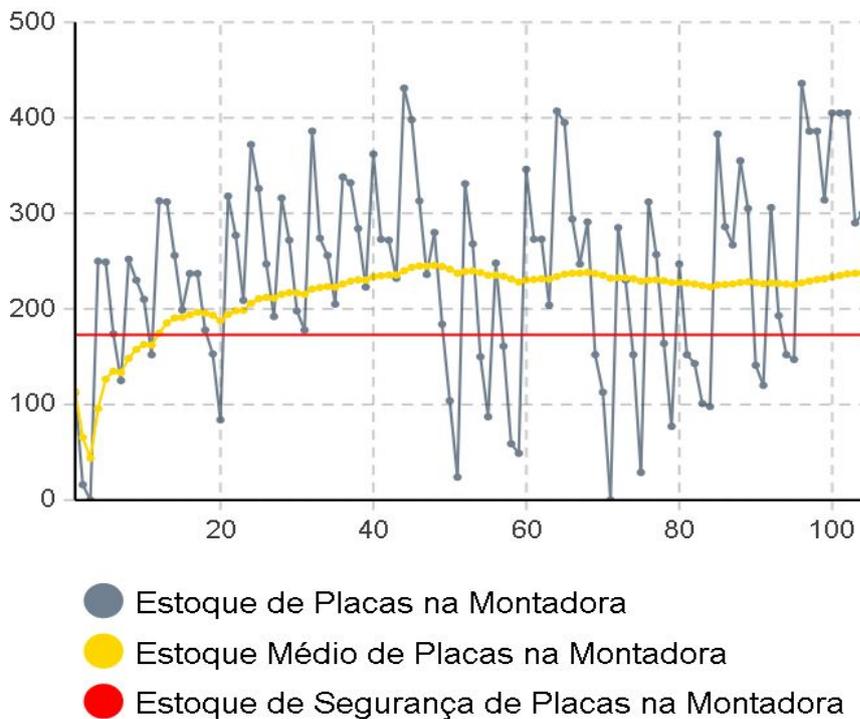
Fonte: Autor (2020)

Figura 61 – Estoque de Componentes - Cenário 10



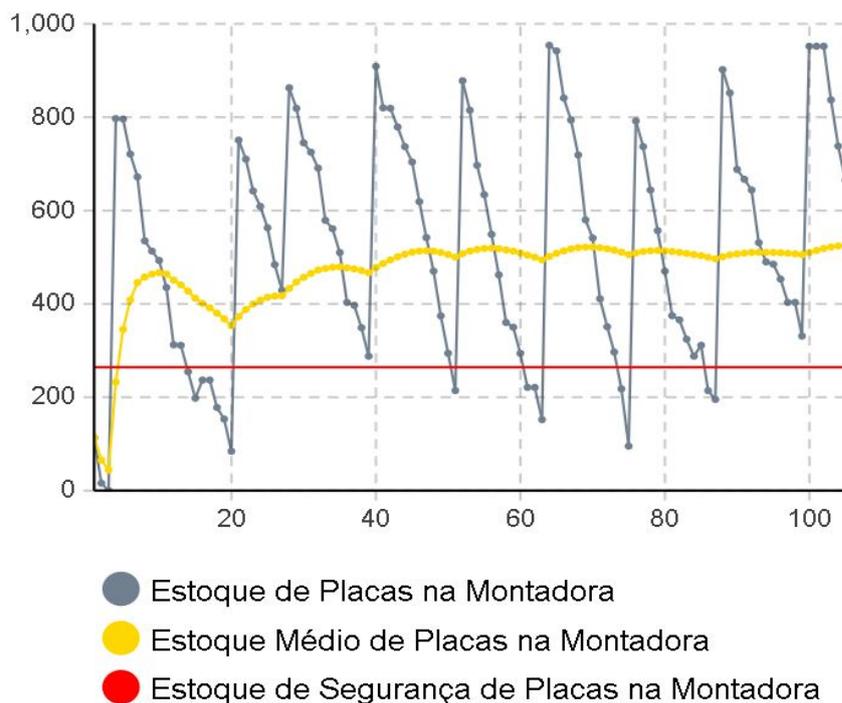
Fonte: Autor (2020)

Figura 62 – Estoque de Placas na Montadora - Cenário 7



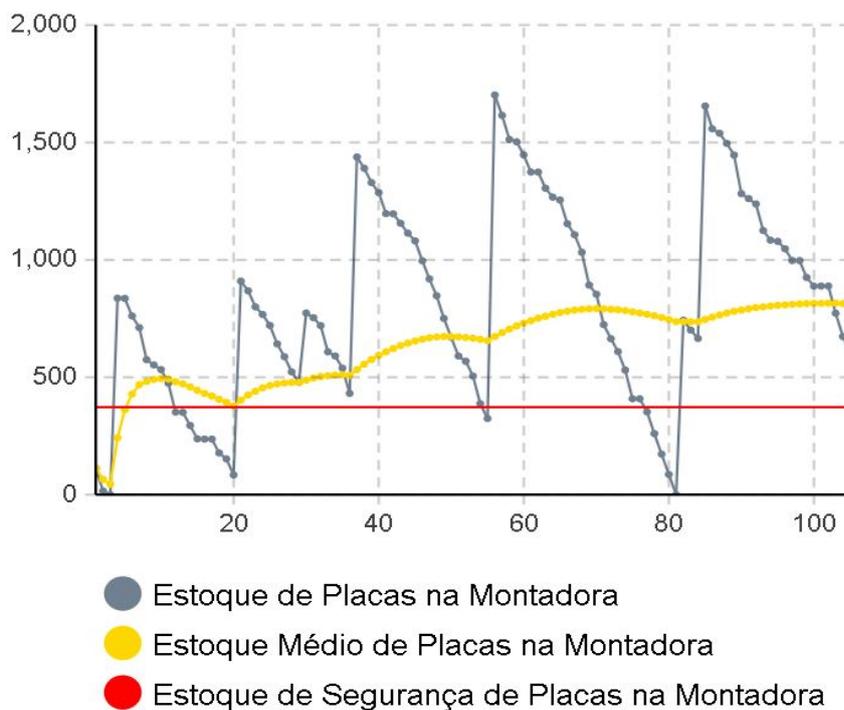
Fonte: Autor (2020)

Figura 63 – Estoque de Placas na Montadora - Cenário 8



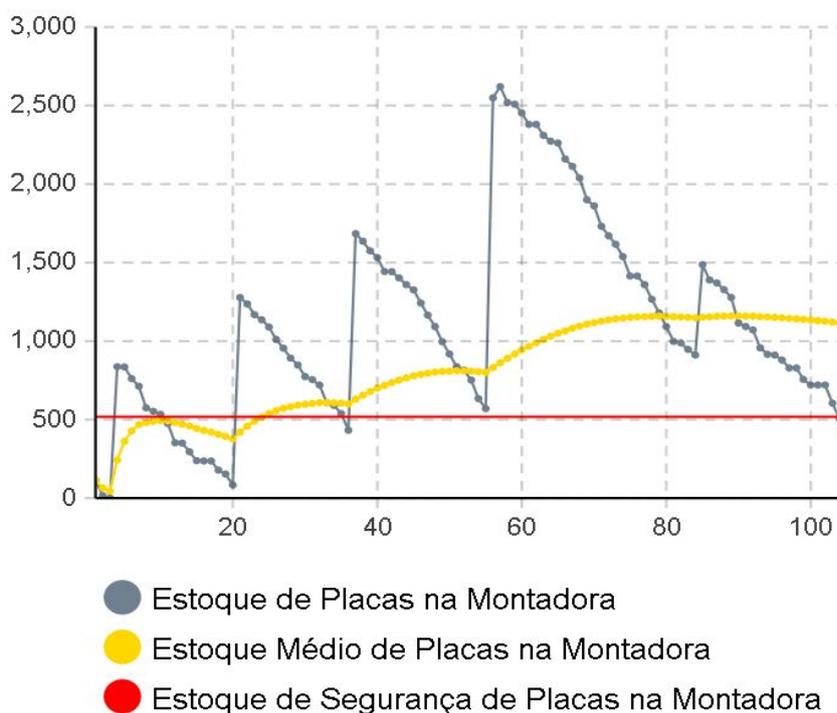
Fonte: Autor (2020)

Figura 64 – Estoque de Placas na Montadora - Cenário 9



Fonte: Autor (2020)

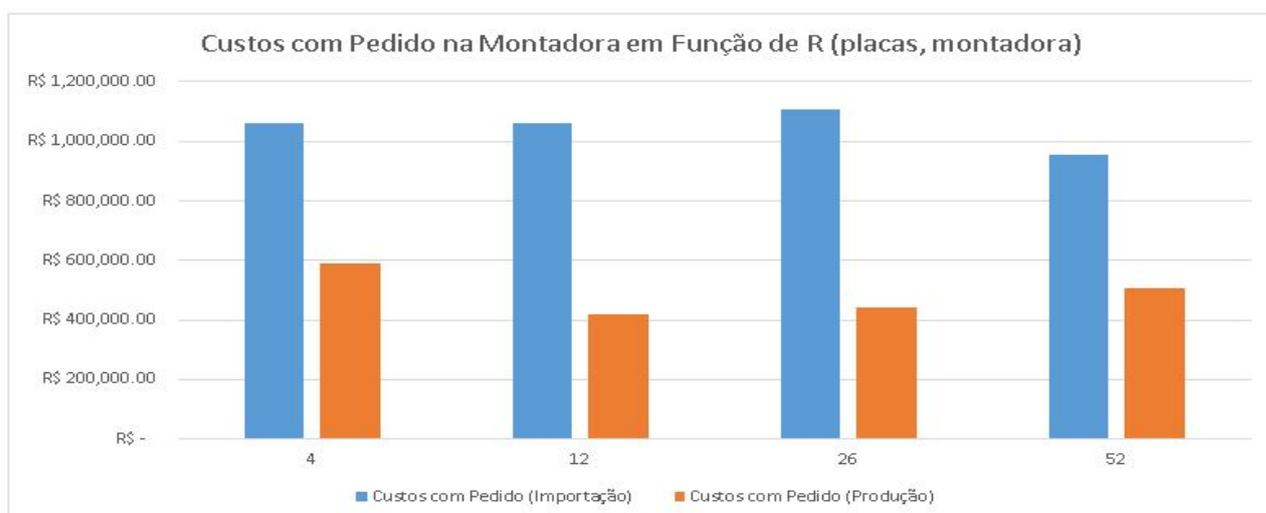
Figura 65 – Estoque de Placas na Montadora - Cenário 10



Fonte: Autor (2020)

No que tange aos custos com pedidos vemos que existe uma diminuição do cenário 7 para o cenário 8, um aumento do cenário 8 para o cenário 9, e uma diminuição novamente do cenário 9 para o cenário 10. Quando destrinchamos os custos com pedido na montadora, temos conforme o gráfico da figura 67.

Figura 66 – Custos com Pedido na Montadora em Função de $R_{placas,montadora}$



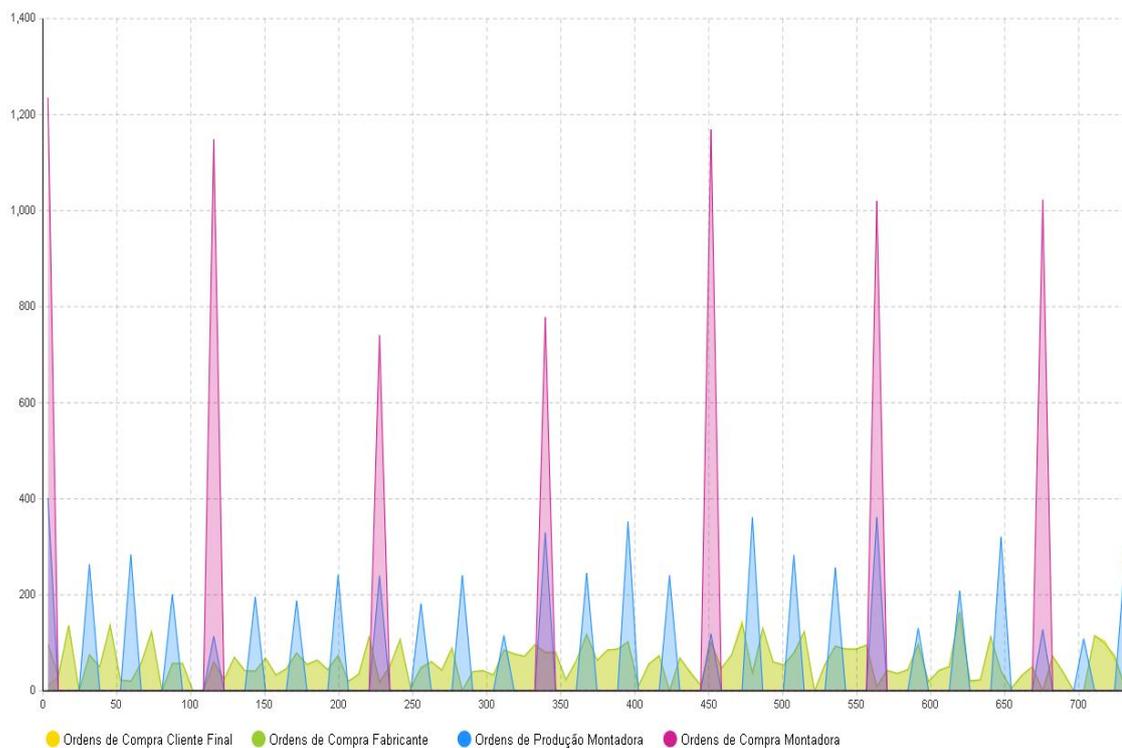
Fonte: Autor (2020)

Isso pode parecer contra-intuitivo, dado que a expectativa era de que os custos

com pedidos fossem apenas diminuir com o aumento dos lotes produtivos. Porém, a mesma explicação se aplica aqui: o efeito gerado pelo processamento de grandes lotes produtivos aumenta a $Q_{total,op,mon.}$ e $Q_{total,oc,mon.}$ principalmente nos cenários 9 e 10 em que $R_{placas,montadora}$ se torna maior que $R_{componentes}$. É importante lembrar que a função de custo de pedido com produção é dada por $10000 + 50Q_{prod.}$ e a função de custos de pedido com importação é dada por $70000 + 80Q_{imp.}$. Vemos que os custos com importação se mantém praticamente constantes entre os cenários 7 e 8 em R\$1.059.520,00 e R\$1.060.880,00, respectivamente. Isso se deve pois a quantidade total de componentes encomendados em cada cenário é praticamente a mesma, sendo 7119 e 7136, respectivamente. Os custos com produção, por sua vez, realmente diminuem do cenário 7 para o cenário 8, saindo de R\$590.350,00 para R\$417.900,00. Essa diminuição acontece por conta da diminuição dos custos fixos com produção, dado que menos lotes são processados no cenário 8 o que no cenário 9 (podemos conferir nas figuras 67 e 68 - linha azul - que o número de ordens de produção geradas no cenário 7 é 27 enquanto no cenário 8 é 9, com uma quantidade total de 6407 no cenário 7 e 6558 no cenário 8). Ou seja, mesmo com um leve aumento na $Q_{total,op,mon.}$ de um cenário para o outro, a diminuição no número de ordens permite menores custos com produção ao diminuir os custos fixos. No entanto, nos cenários 9 e 10 os custos com produção voltam a aumentar, e isso se deve justamente ao aumento brusco que ocorre na $Q_{total,op,mon.}$ nos cenários 9 e 10. No cenário 9, embora sejam geradas apenas 5 ordens de produção, um total de 7861 unidades são encomendadas. No cenário 10, embora sejam geradas apenas 3 ordens de produção, 9488 de unidades são encomendadas. No que tange à importação, vemos que no cenário 9 os custos aumentam justamente por conta do aumento da $Q_{total,oc,mon.}$. Neste cenário, são realizadas 5 ordens de compra de componentes somando um total de 7730 componentes (um aumento de 17,87% na $Q_{total,oc,mon.}$ em relação ao cenário 8). Ou seja, mesmo com menos importações (que diminui os custos fixos), o aumento na $Q_{total,oc,mon.}$ faz com que os custos de importação sejam maiores no cenário 9. A curiosidade fica para o cenário 10, em que a $Q_{total,oc,mon.}$ é menor que $Q_{total,oc,mon.}$ no cenário 9. Isso é contra-intuitivo, pois vimos que conforme os lotes de produção aumentam, os lotes de compra de componentes também aumentam em cada cenário, logo não faz sentido que $Q_{total,oc,mon.}$ no cenário em $R_{placas,montadora}$ é 26 semanas seja menor que $Q_{total,oc,mon.}$ no cenário em que $R_{placas,montadora}$ é 52 semanas. Isso se dá pois ao fim dos dois anos de simulação falta muito pouco para o próximo ciclo de reposição de compra de componentes na montadora. Se estendêssemos a simulação por mais 8 semanas veríamos que o $Q_{total,oc,mon.}$ seria de 10723 unidades. Ou seja, ao fim dos dois anos de simulação a montadora ainda não completou o ciclo de revisão do estoque de componentes para atender às 9488 unidades de placas encomendadas pela produção. Porém como limitamos todos os cenários para exatamente 2 anos de

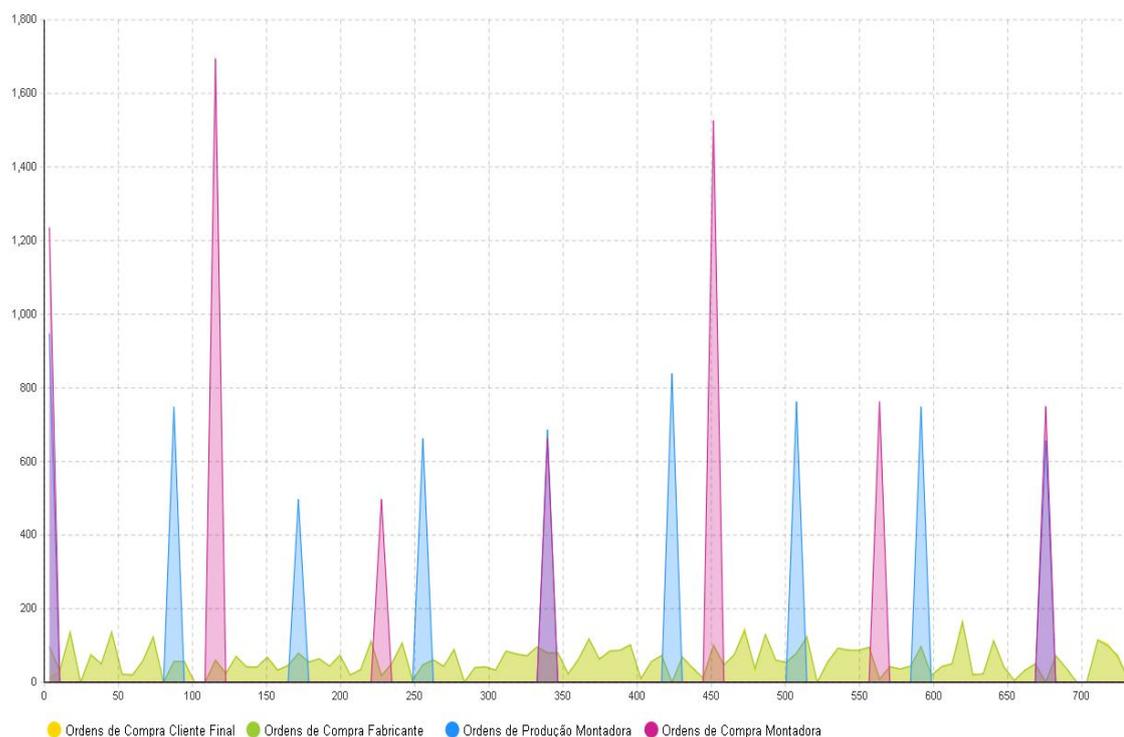
simulação, manteremos assim para não enviesar a análise. As figuras 68, 69, 70 e 71 trazem o comportamento dos pedidos ao longo do tempo em cada um dos 4 cenários enquanto a tabela 30 apresenta os dados referentes às variabilidade dos pedidos e quantidades totais encomendadas por cada elo.

Figura 67 – Efeito Chicote - Cenário 7



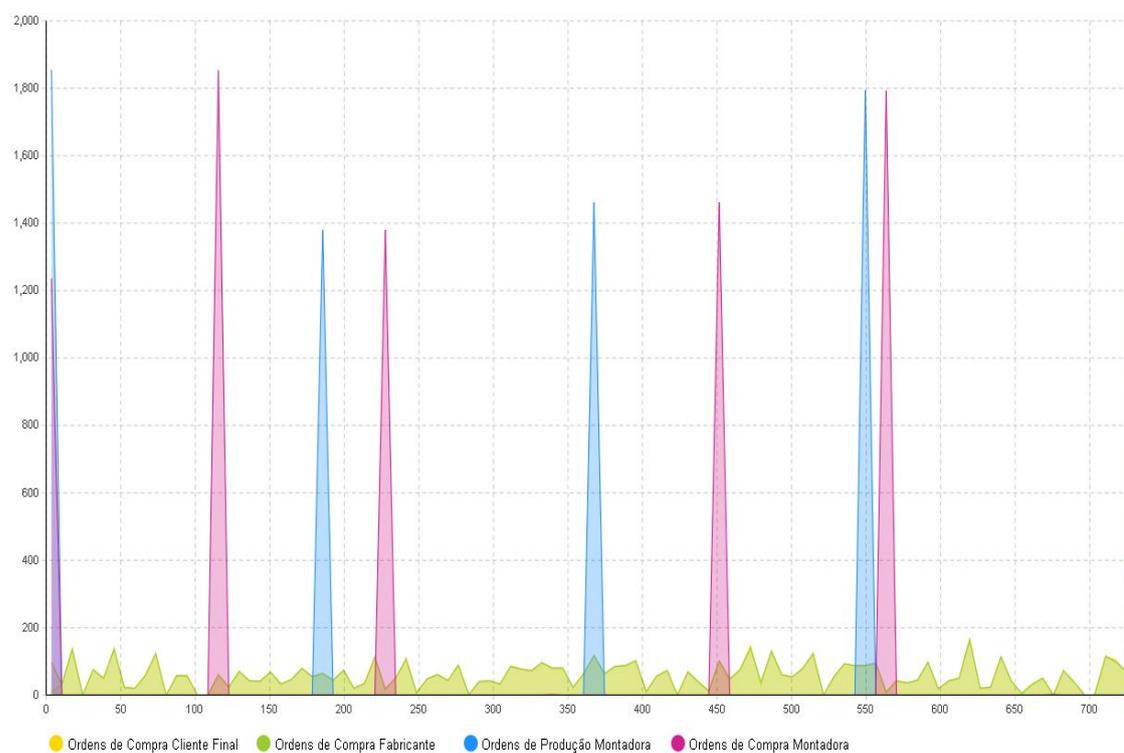
Fonte: Autor (2020)

Figura 68 – Efeito Chicote - Cenário 8



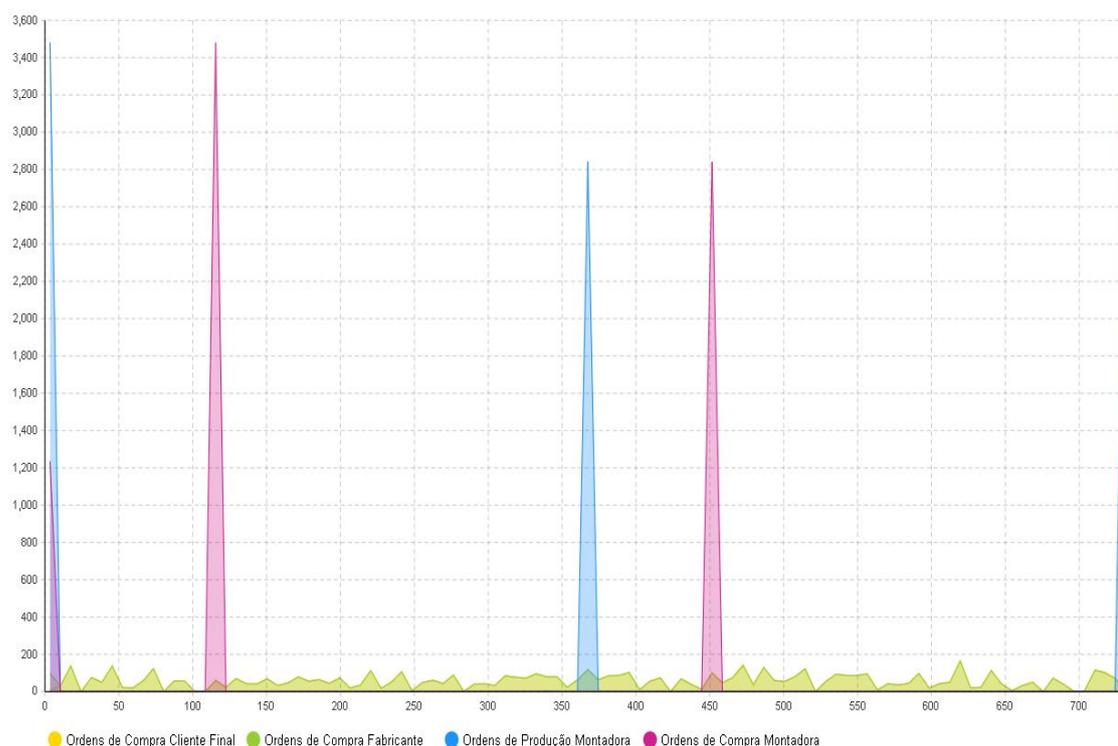
Fonte: Autor (2020)

Figura 69 – Efeito Chicote - Cenário 9



Fonte: Autor (2020)

Figura 70 – Efeito Chicote - Cenário 10



Fonte: Autor (2020)

Tabela 30 – Métricas de Pedido e Efeito Chicote - Cenários 7, 8, 9 e 10

Métrica	C7	C8	C9	C10
$(Q_{total,cliente})$	6011	6011	6011	6011
$(Q_{total,oc,fab.})$	6011	6011	6011	6011
$(Q_{total,op,mon.})$	6407	6558	7861	9488
$(Q_{total,oc,mon.})$	7119	7136	7730	7562
$(CV_{oc,cliente})$	67,78%	67,78%	67,78%	67,78%
$(CV_{oc,fabricante})$	66,29%	66,29%	66,29%	66,29%
$(CV_{op,montadora})$	184,43%	332,89%	453,54%	587,93%
$(CV_{oc,montadora})$	382,08%	410,31%	454,62%	626,66%

Fonte: Autor (2020)

Portanto, temos que entre o cenário 4, que é o melhor entre os 6 primeiros cenários, e os 4 cenários analisados agora, os custos totais com a cadeia são:

Tabela 31 – Custos Totais da Cadeia - Cenários 7, 8, 9 e 10

Cenário	Custo Total da Cadeia
C4	R\$3.738.326,20
C7	R\$3.102.340,90
C8	R\$3.170.309,51
C9	R\$3.597.555,55
C10	R\$3.992.157,44

Fonte: Autor (2020)

Desta forma, temos que para os 10 primeiros cenários analisados, temos que o melhor cenário até é o cenário 7 com custo total de R\$3.102.340,90, para um $R_{componentes} = 16$ semanas, $S_{componentes} = 1824$ unidades e um $R_{placas_{montadora}} = 4$ semanas e $S_{placas_{montadora}} = 342$ unidades. Agora, seguindo o procedimento, prosseguiremos com a discussão variando o $R_{placas_{fabricante}}$ e o $S_{placas_{fabricante}}$ mantendo os parâmetros (R, S) para a compra de componentes e produção de placas do cenário 7.

5.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS CENÁRIOS 11, 12, 13 E 14

Seguindo a mesma lógica das duas primeiras análises comparativas, iremos agora comparar os resultados quando variamos o $R_{placas_{fabricante}}$ mantendo os parâmetros (R, S) para compra de componentes e produção de placas na montadora.

Assim como nos 10 primeiros cenários, os resultados em termos de abastecimento são os mesmos. A tabela 32 traz os dados de abastecimento para os 4 cenários simulados.

Tabela 32 – Métricas de Abastecimento - Cenários 11, 12, 13 e 14

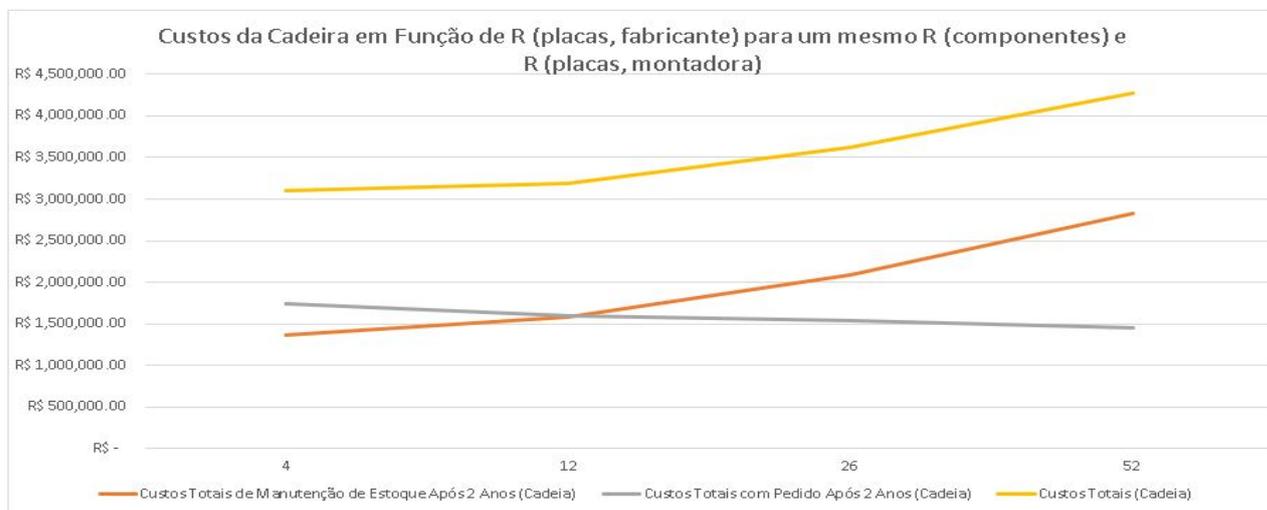
Total de Pedidos Recebidos	6011
Total de Pedidos Entregues	5924
Taxa de Abastecimento	98,55%
Total Pedidos em Produção + Fila	87
Taxa de Disponibilidade	100%
LT Médio de Entrega para o Cliente Final	9,45
Dias Estoque da Fabricante Desabastecido	0

Fonte: Autor (2020)

Mesmo com os mesmos resultados em termos de abastecimento, esperamos uma diferença na performance da cadeia quanto aos custos gerados pelas diferentes estratégias de reposição da fabricante. Na figura 71 temos os resultados dos custos

totais de manutenção de estoque, de pedidos e totais da cadeia para os cenários 11, 12, 13 e 14.

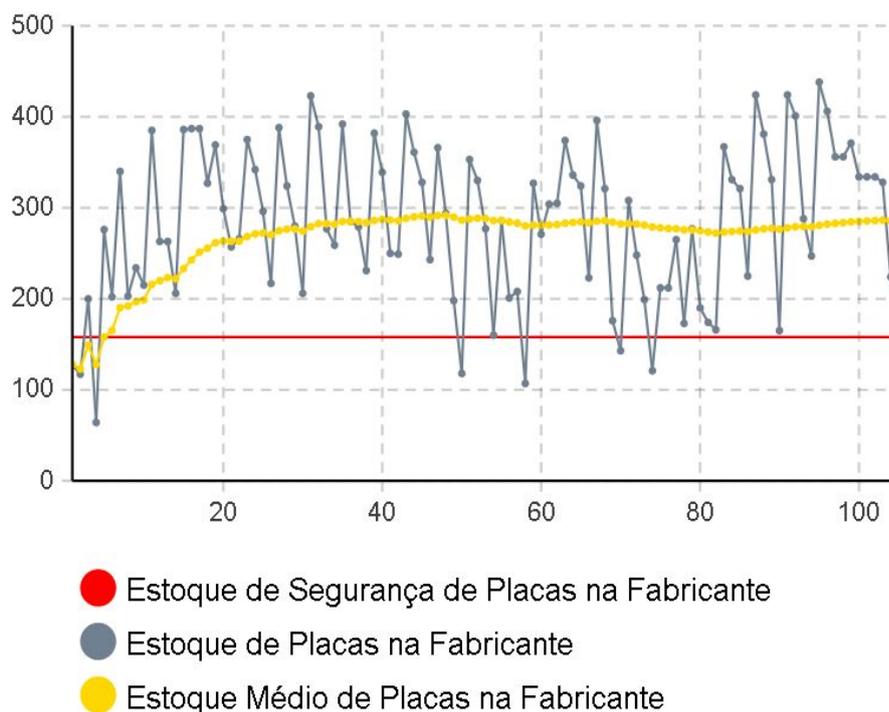
Figura 71 – Custos da Cadeia em Função de $R_{placas, fabricante}$



Fonte: Autor (2020)

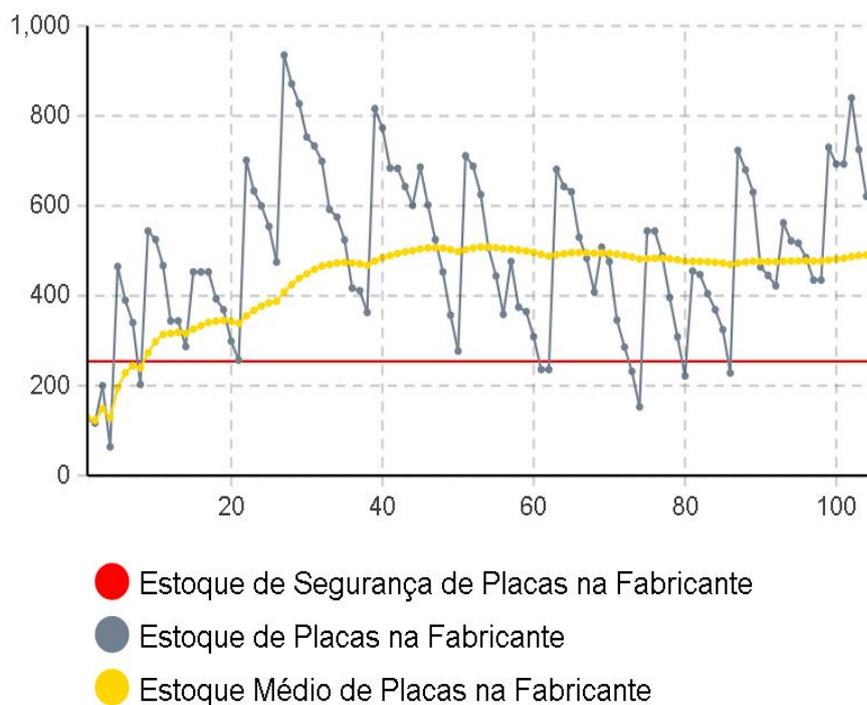
No que tange aos custos de manutenção de estoque da fabricante, é intuitivo perceber que eles só tendem a aumentar conforme o período de revisões aumenta. Isso se dá pois os lotes passam a ser maiores e por consequência, os estoques médios na fabricante passam a ser maiores.

Figura 72 – Estoque de Placas na Fabricante - Cenário 11



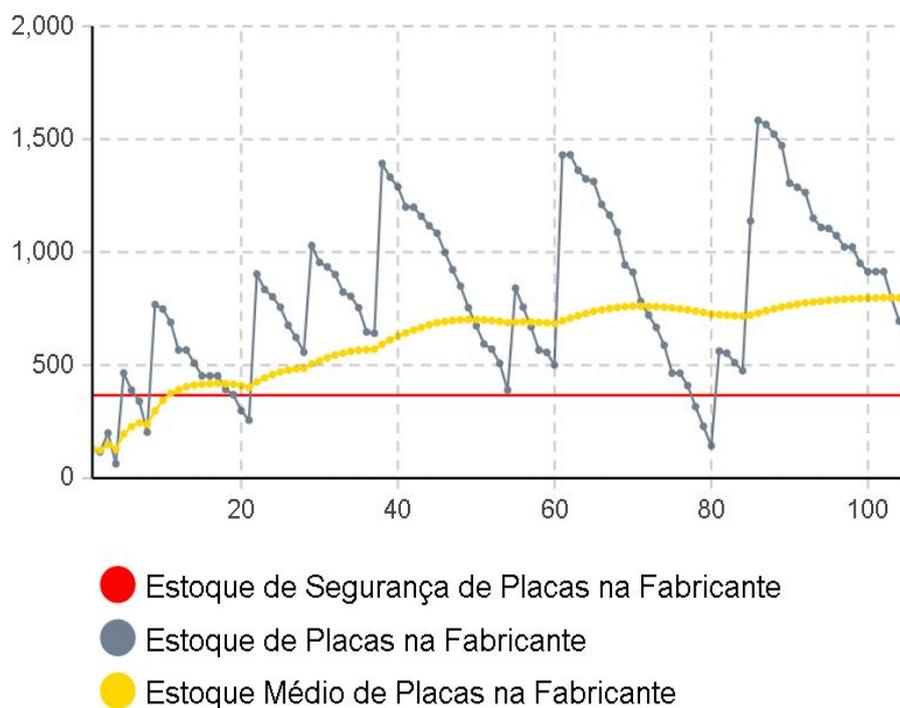
Fonte: Autor (2020)

Figura 73 – Estoque de Placas na Fabricante - Cenário 12



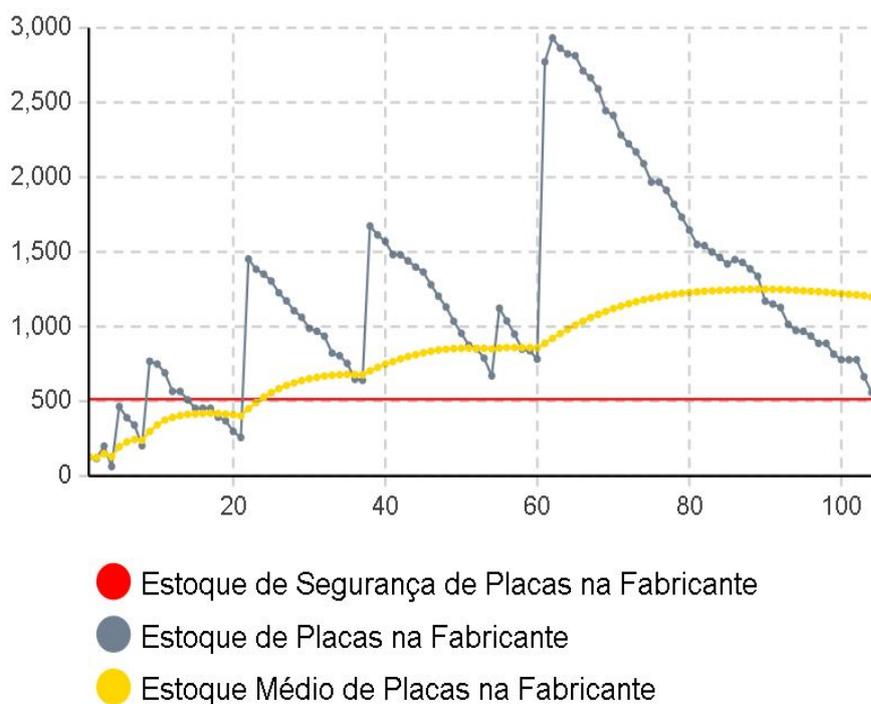
Fonte: Autor (2020)

Figura 74 – Estoque de Placas na Fabricante - Cenário 13



Fonte: Autor (2020)

Figura 75 – Estoque de Placas na Fabricante - Cenário 14

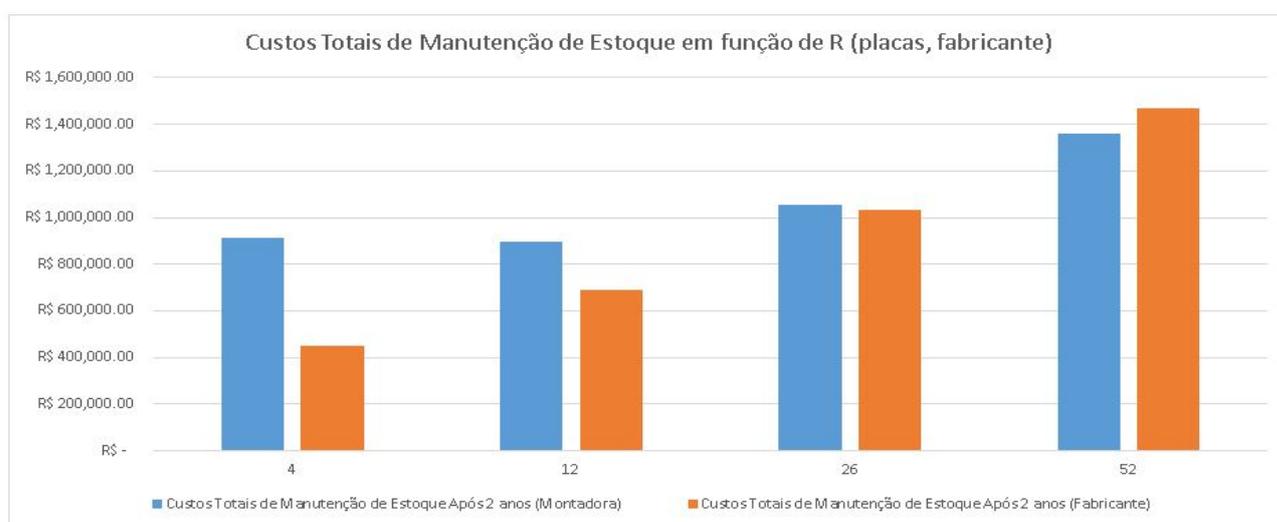


Fonte: Autor (2020)

Vimos na análise comparativa dos cenários 7, 8, 9 e 10 que o efeito gerado

pelo aumento dos períodos entre revisões é aumentar os lotes não apenas do elo em que aumenta o período entre revisões mas de todas as etapas à montante da cadeia. Podemos esperar, portanto, que o aumento dos tamanhos de lote de compra da fabricante irá gerar um aumento nos lotes de produção e de compra de componentes na montadora de placas. De fato, quando olhamos para como os custos com manutenção de estoque variam com o aumento de $R_{placas\ fabricante}$ podemos perceber que os custos de manutenção de estoque aumentam não apenas para a fabricante, mas também para a montadora, conforme podemos conferir na figura 76.

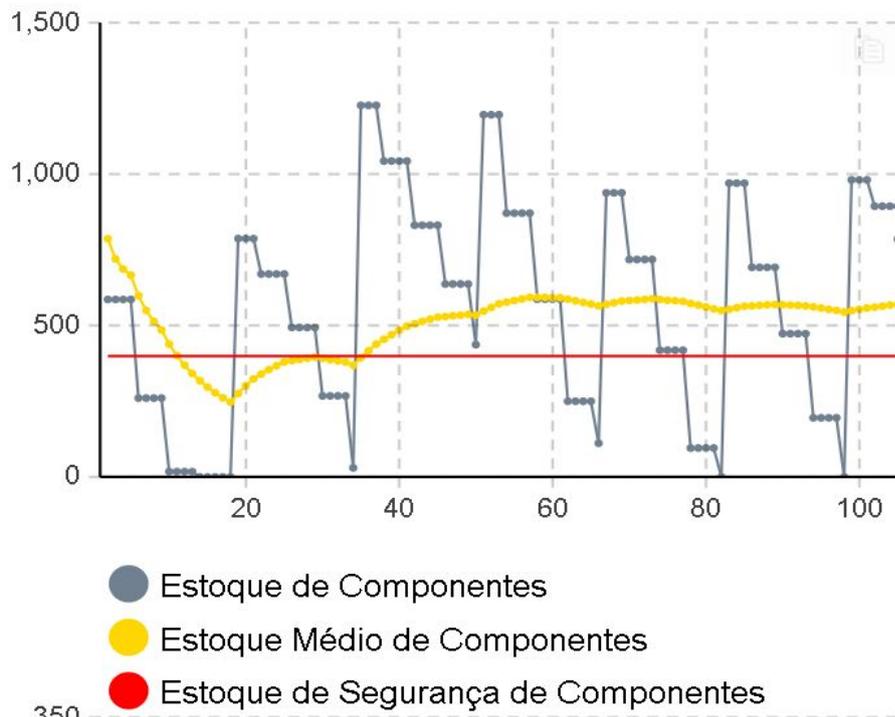
Figura 76 – Custos Totais com Man. dos Estoques em Função de $R_{placas, fabricante}$



Fonte: Autor (2020)

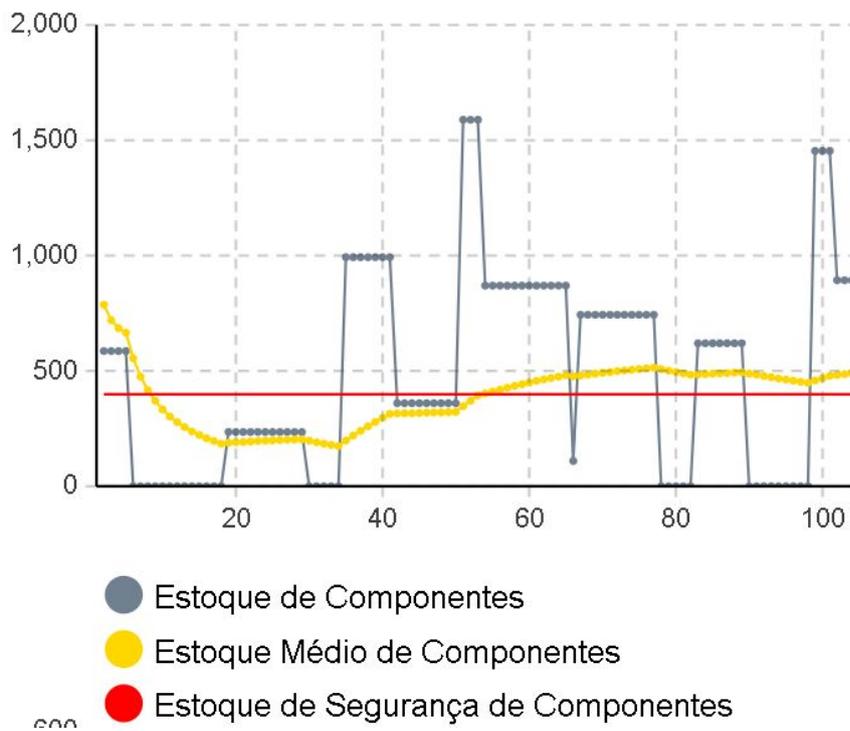
De fato, vemos que nos cenários para 11 e 12, para o qual $R_{placas\ fabricante} = 4$ e $R_{placas\ fabricante} = 12$, respectivamente, a montadora mantém seus custos com estoque praticamente constantes, no entanto para os cenários $R_{placas\ fabricante} = 26$ e $R_{placas\ fabricante} = 52$ os custos com manutenção de estoques enfrentados pela montadora aumentam substancialmente devido ao aumento substancial nos lotes de produção e componentes gerados pelas ordens de compra da fabricante.

Figura 77 – Estoque de Componentes - Cenário 11



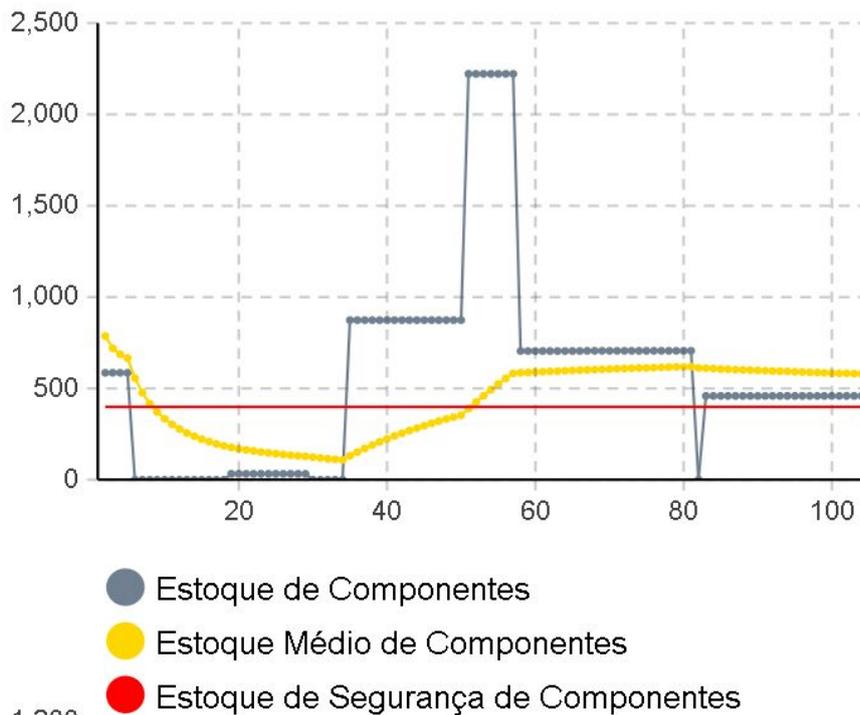
Fonte: Autor (2020)

Figura 78 – Estoque de Componentes - Cenário 12



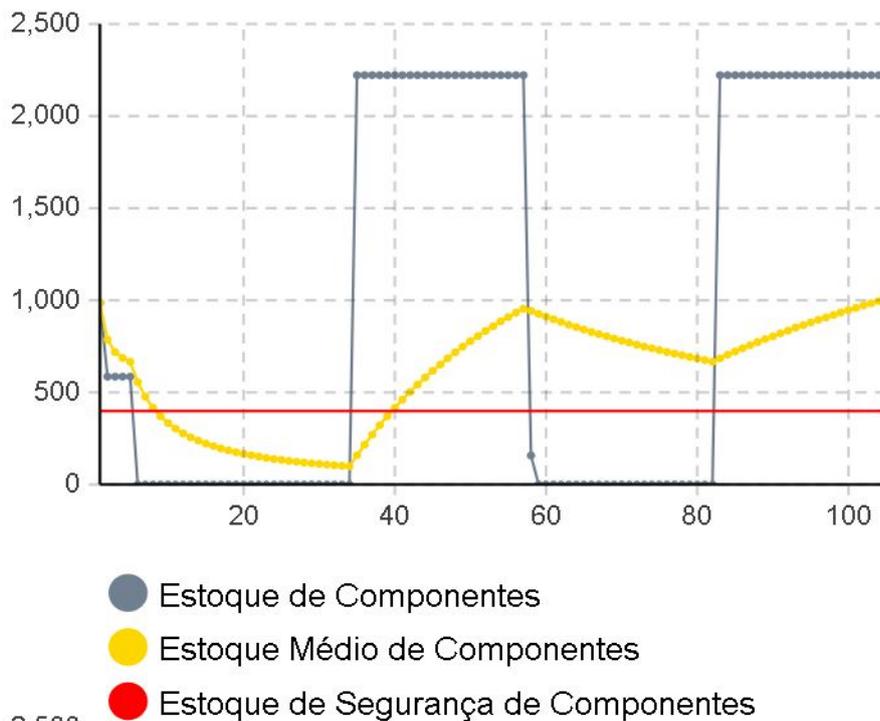
Fonte: Autor (2020)

Figura 79 – Estoque de Componentes - Cenário 13



Fonte: Autor (2020)

Figura 80 – Estoque de Componentes - Cenário 14

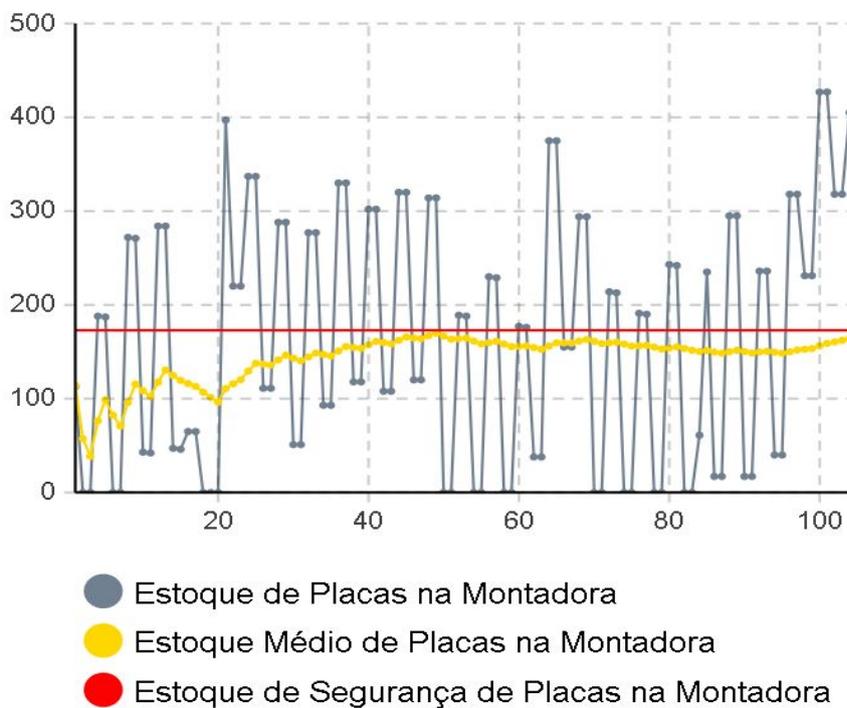


Fonte: Autor (2020)

Quando olhamos para os estoques médios de placas na montadora, temos

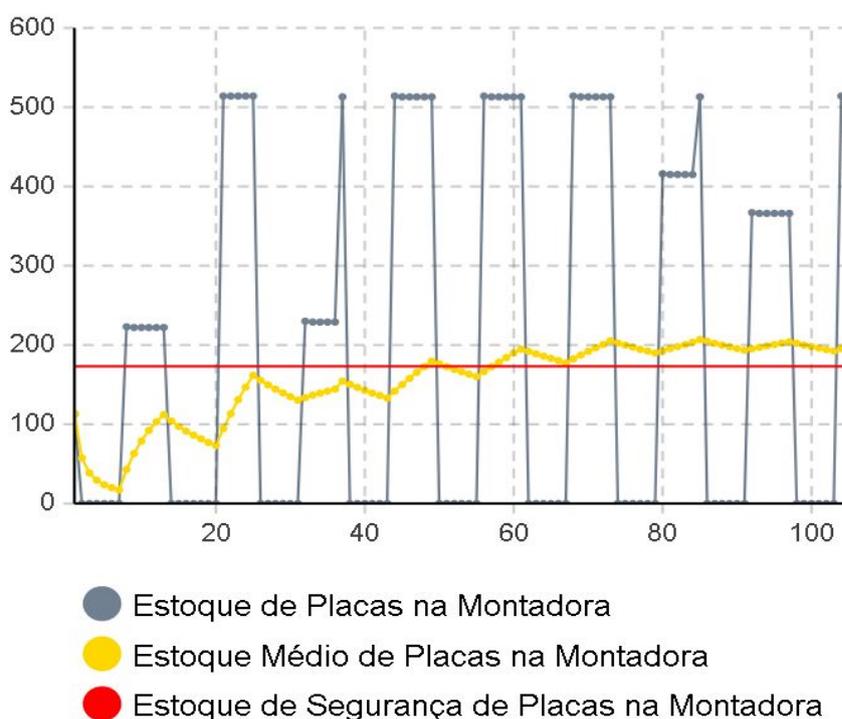
conforme as figuras abaixo:

Figura 81 – Estoque de Placas na Montadora - Cenário 11



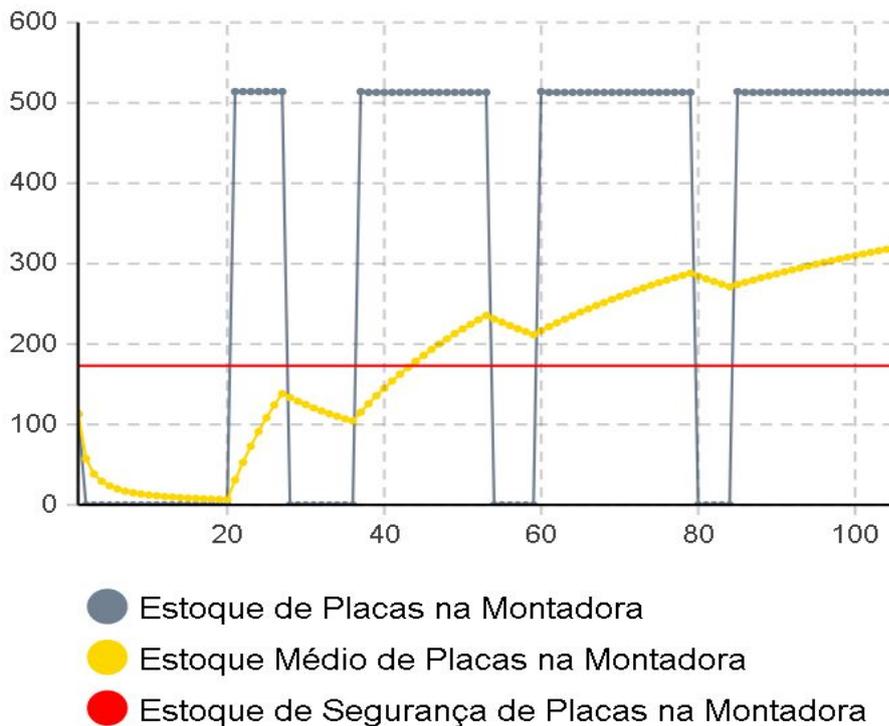
Fonte: Autor (2020)

Figura 82 – Estoque de Placas na Montadora - Cenário 12



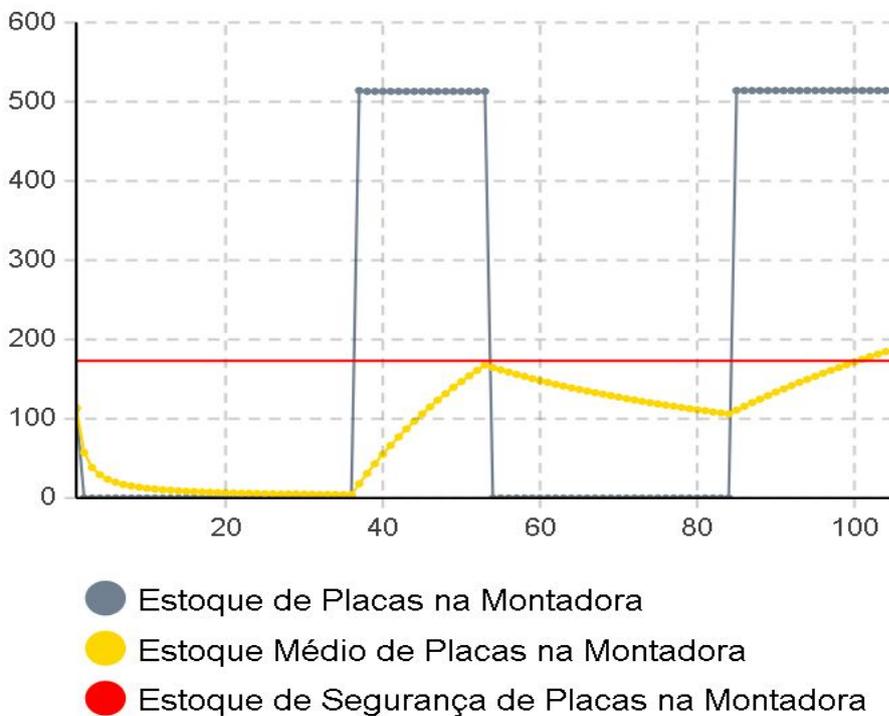
Fonte: Autor (2020)

Figura 83 – Estoque de Placas na Montadora - Cenário 13



Fonte: Autor (2020)

Figura 84 – Estoque de Placas na Montadora - Cenário 14

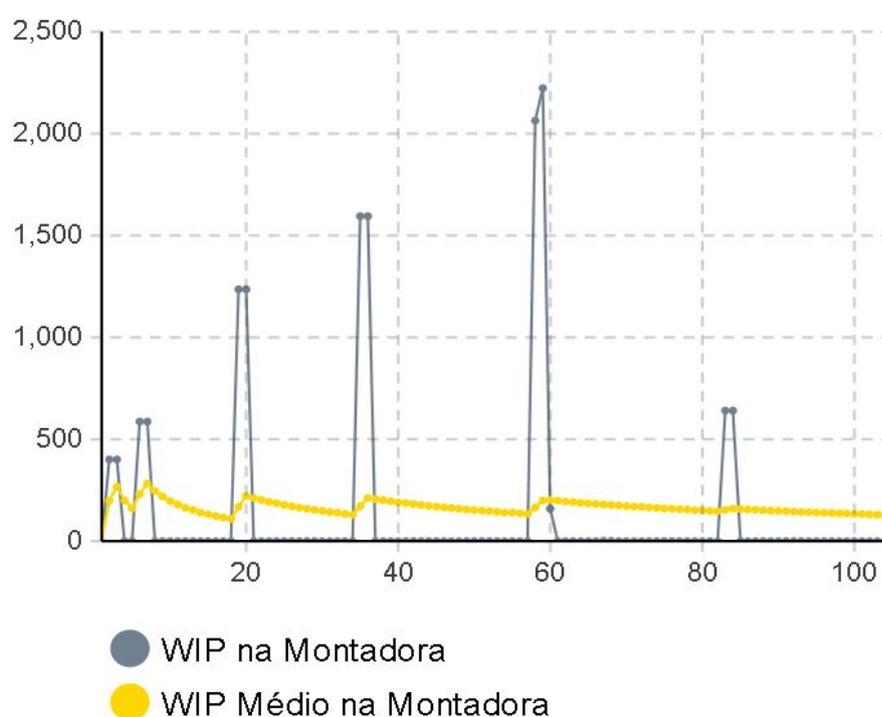


Fonte: Autor (2020)

É importante frisar que existe uma diminuição nos estoques médios da mon-

tadora no cenário 14 em relação ao cenário 13 por conta do fato de que no cenário 14 a montadora fica "devendo" muitas placas para a fabricante, que coloca ordens de compra para as quais a montadora não tem componentes disponíveis para atender de imediato por durante a simulação. Isso faz com que as placas não fiquem paradas no estoque após serem produzidas. Dessa forma, quando a montadora recebe os componentes e produz, ela despacha imediatamente as ordens pendentes que tem com a fabricante. Podemos ver isso através do gráfico que monitora o WIP da montadora durante a simulação.

Figura 85 – WIP na Montadora - Cenário 14



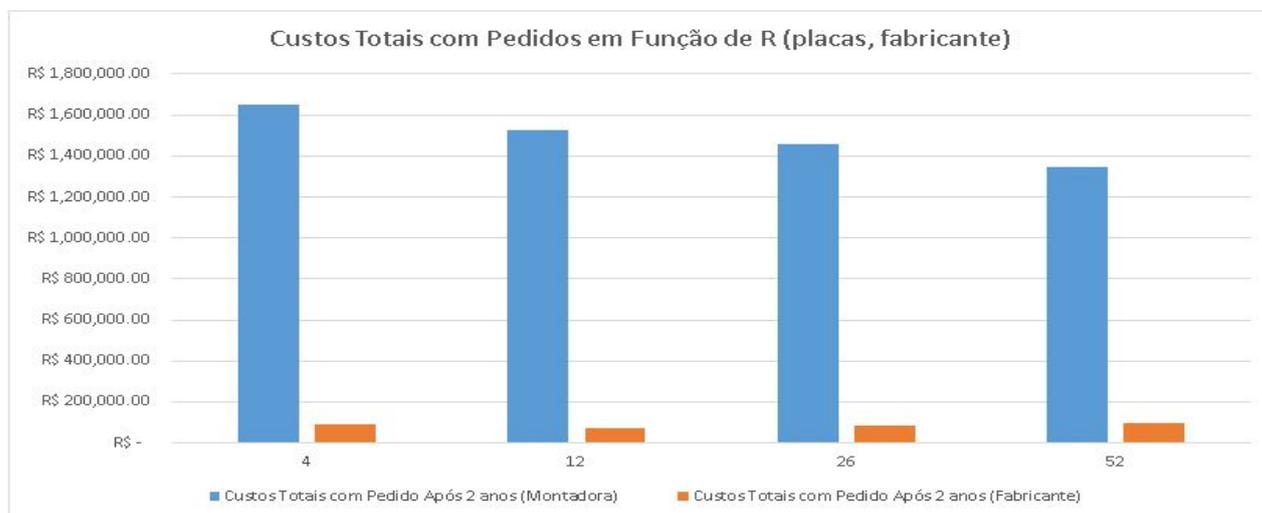
Fonte: Autor (2020)

Nesse gráfico, podemos perceber que de fato a montadora produz lotes de cerca de 1500 unidades e posteriormente de cerca de 2100 unidades. No entanto, esses lotes produtivos não se refletem nos níveis de estoque pois fluem diretamente para a fabricante.

No que tange aos custos com pedidos, pouco se deve às economias que a fabricante experimenta com o aumento dos lotes de compra. É importante lembrar que a função de custo de pedido para as compras da fabricante é definida por $1000 + 10Q_{trans.}$. Como a parte fixa dos custos do pedido é de apenas R\$1.000,00, é de se esperar que a diminuição nas frequências das entregas causada pelo aumento dos períodos entre revisões não seja tão impactante em relação aos custos com pedido. De fato, a diminuição dos custos dos pedidos experimentadas pela cadeia mais se

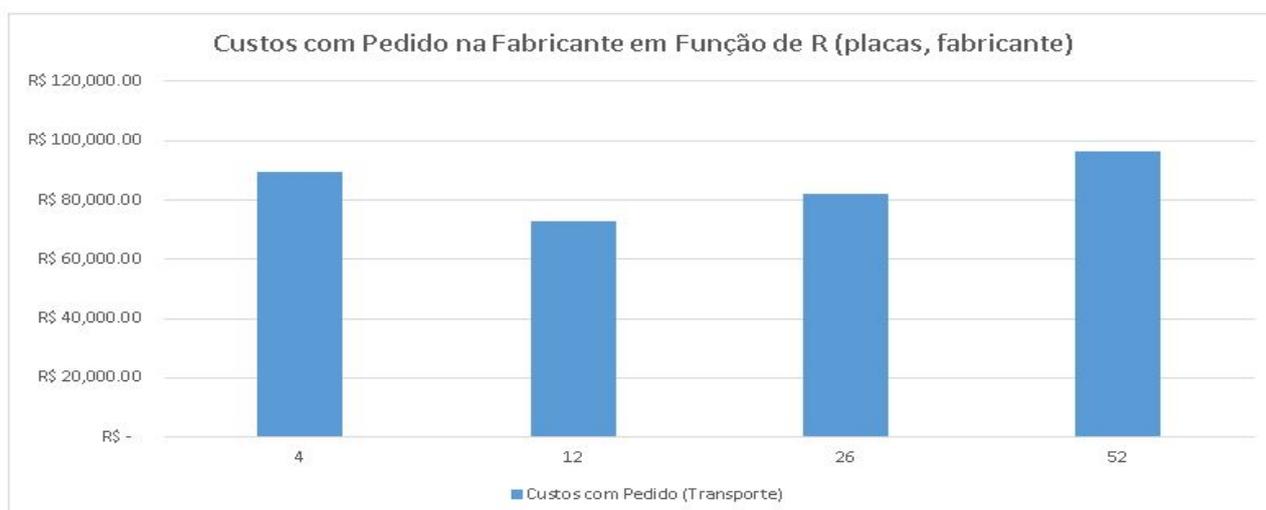
deve aos custos com produção que diminuem com o aumento dos lotes de produção e aos custos de importação que diminuem com o aumento dos lotes de importação.

Figura 86 – Custos Totais com Pedidos em Função de $R_{placas, fabricante}$



Fonte: Autor (2020)

Quando olhamos especificamente para os custos com pedido na fabricante, vemos que do cenário 11 para o cenário 12, de fato há uma redução nos custos com pedidos (transporte). No entanto, no cenário 13 e 14 os custos com pedido da fabricante voltam a aumentar, e isso se deve ao fato que a $Q_{total,oc,fab.}$ aumenta substancialmente nos cenários 13 e 14. Ou seja, a quantidade encomendada pela fabricante ao longo dos dois anos de simulação é substancialmente maior nesses últimos dois cenários, o que faz com o que os custos com pedido (que são função de Q) voltem a aumentar.

Figura 87 – Custos Totais com Pedidos da Fabricante em Função de $R_{placas,fabricante}$ 

Fonte: Autor (2020)

Na tabela 33, temos os dados referentes às quantidades totais encomendadas por cada elo e a variabilidade dos pedidos.

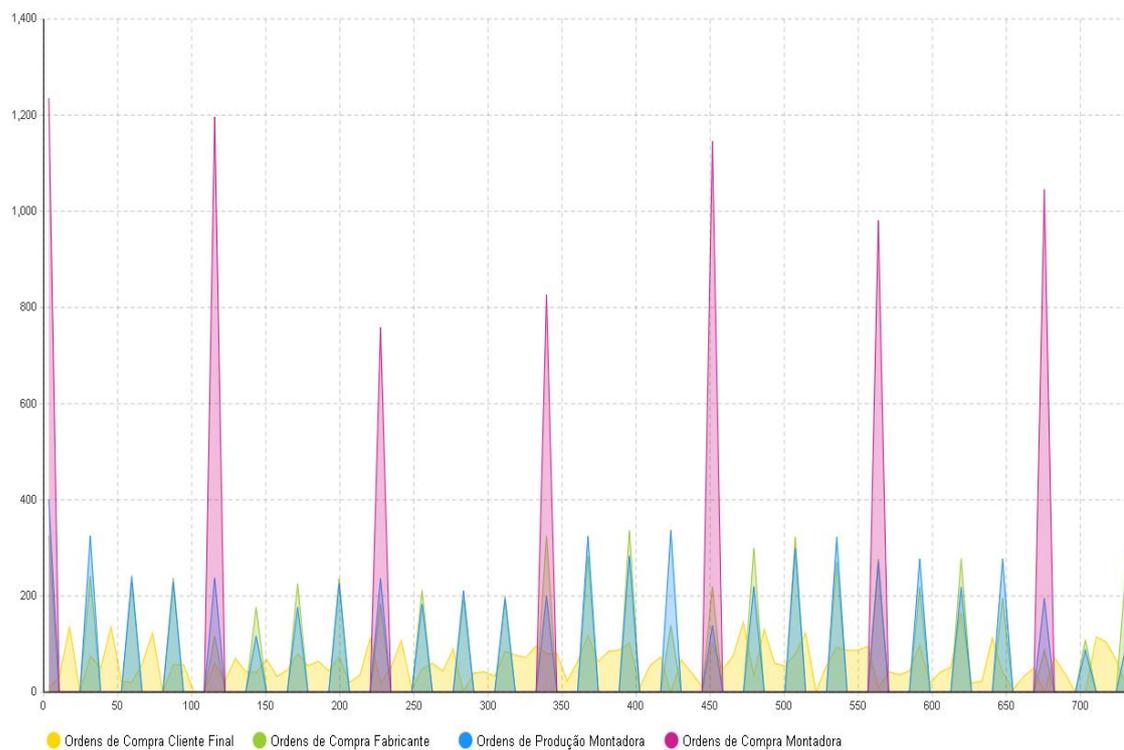
Tabela 33 – Métricas de Pedidos e Efeito Chicote - Cenários 11, 12, 13 e 14

Métrica	C11	C12	C13	C14
$(Q_{total,cliente})$	6011	6011	6011	6011
$(Q_{total,oc,fab.})$	6240	6391	7703	9332
$(Q_{total,op,mon.})$	6349	6792	6819	6684
$(Q_{total,oc,mon.})$	7193	7466	8055	7920
$(CV_{oc,cliente})$	67,78%	67,78%	67,78%	67,78%
$(CV_{oc,fabricante})$	180,20%	333,71%	453,60%	587,54%
$(CV_{op,montadora})$	181,69%	313,18%	481,01%	682,43%
$(CV_{oc,montadora})$	381,40%	395,28%	459,66%	633,01%

Fonte: Autor (2020)

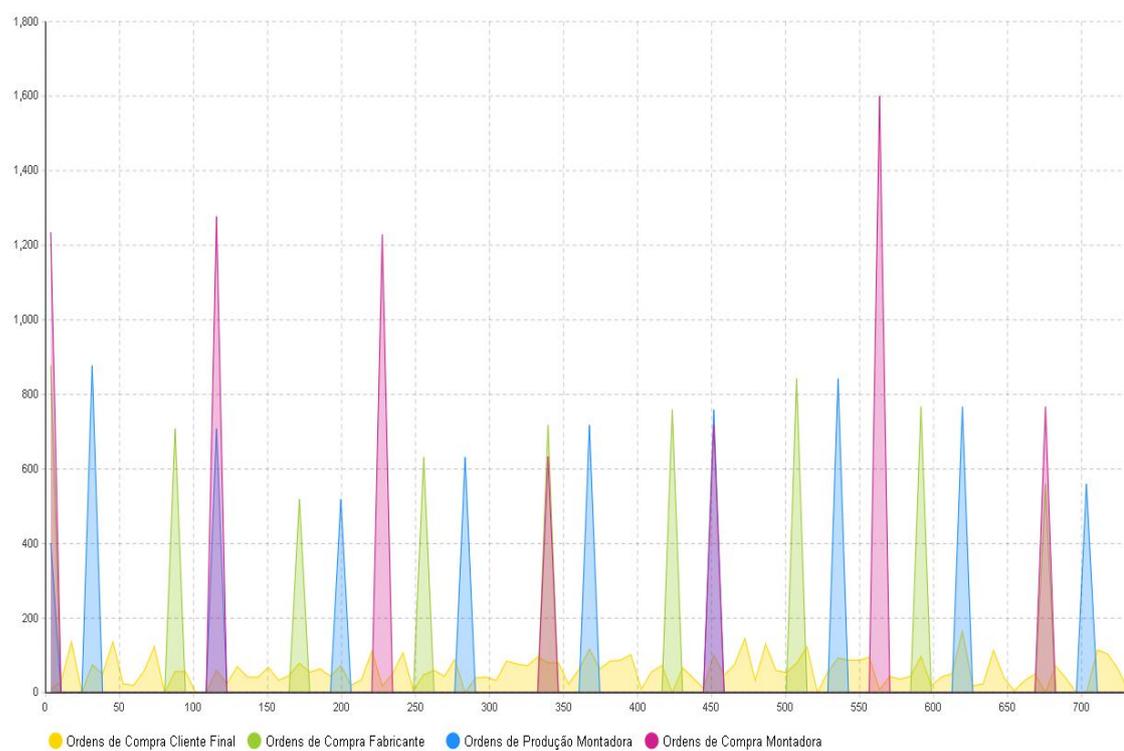
Por fim, temos os dados referentes ao comportamento dos pedidos ao longo da simulação em cada um dos 4 cenários simulados.

Figura 88 – Efeito Chicote - Cenário 11



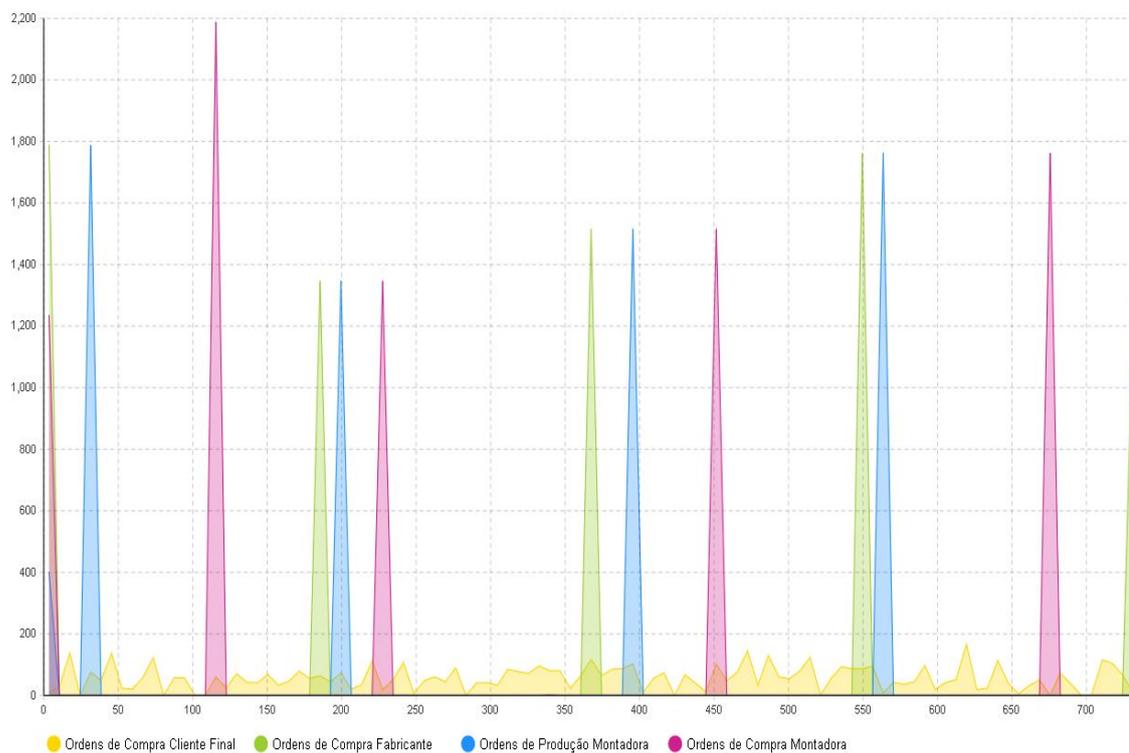
Fonte: Autor (2020)

Figura 89 – Efeito Chicote - Cenário 12



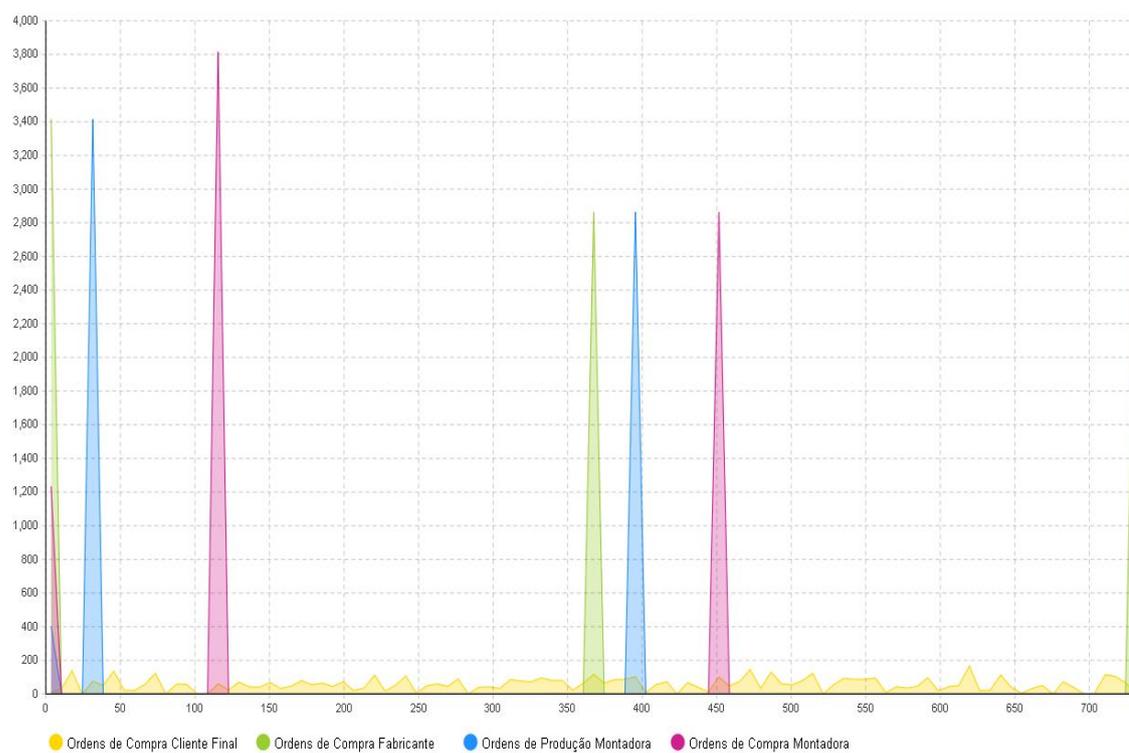
Fonte: Autor (2020)

Figura 90 – Efeito Chicote - Cenário 13



Fonte: Autor (2020)

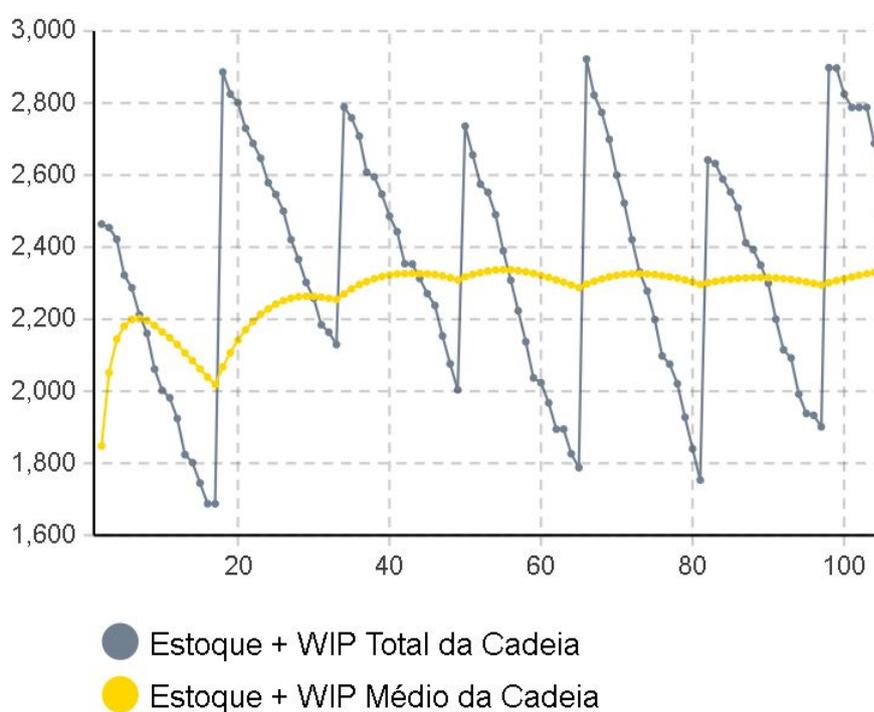
Figura 91 – Efeito Chicote - Cenário 14



Fonte: Autor (2020)

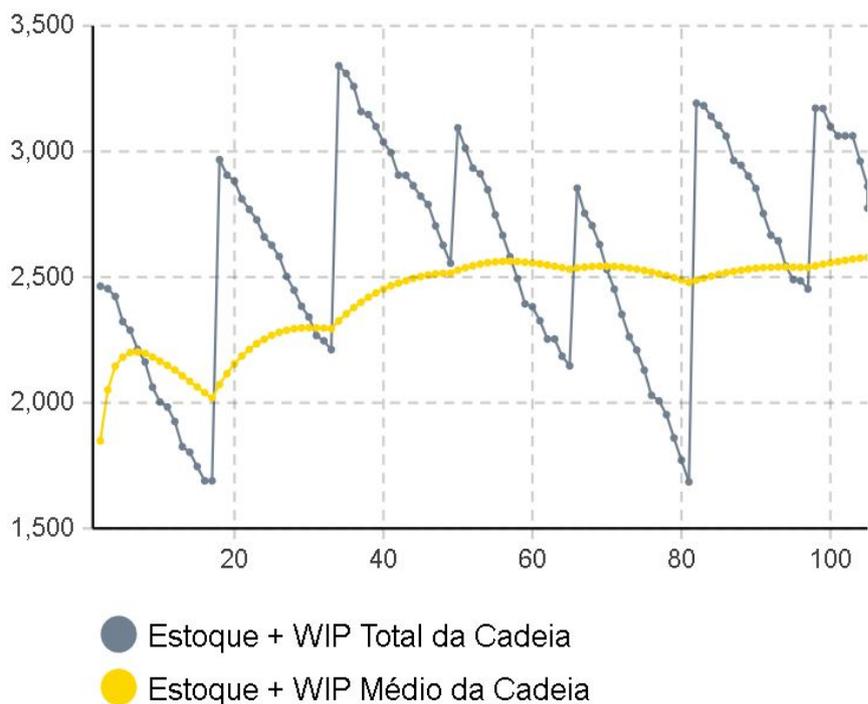
É notório que o efeito de aumentar os lotes quanto mais à jusante na cadeia tende a aumentar os lotes também nas etapas à montante da cadeia, mesmo que as etapas à montante tenham determinadas políticas de revisão de estoque mais frequentes. Em outras palavras: quando se concentram lotes grandes mais próximos ao cliente final, todas as etapas anteriores da cadeia deverão processar lotes maiores, o que diminuirá os custos com pedidos, porém aumentará substancialmente os custos com manutenção dos estoques. Abaixo temos como os níveis de estoque totais da cadeia se comportam em cada cenário.

Figura 92 – Estoque + WIP total da Cadeia - Cenário 11



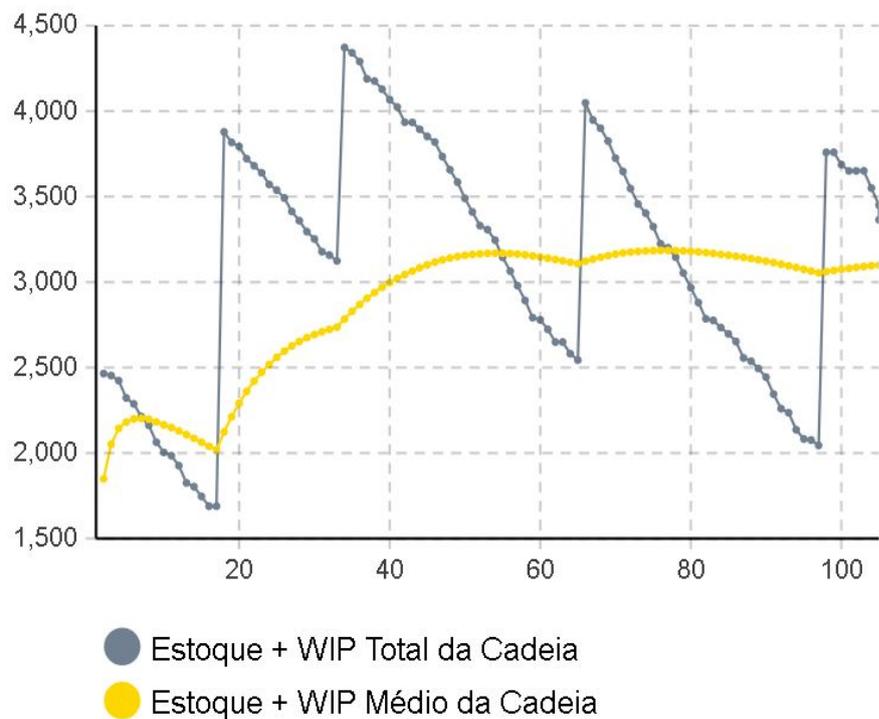
Fonte: Autor (2020)

Figura 93 – Estoque + WIP total da Cadeia - Cenário 12



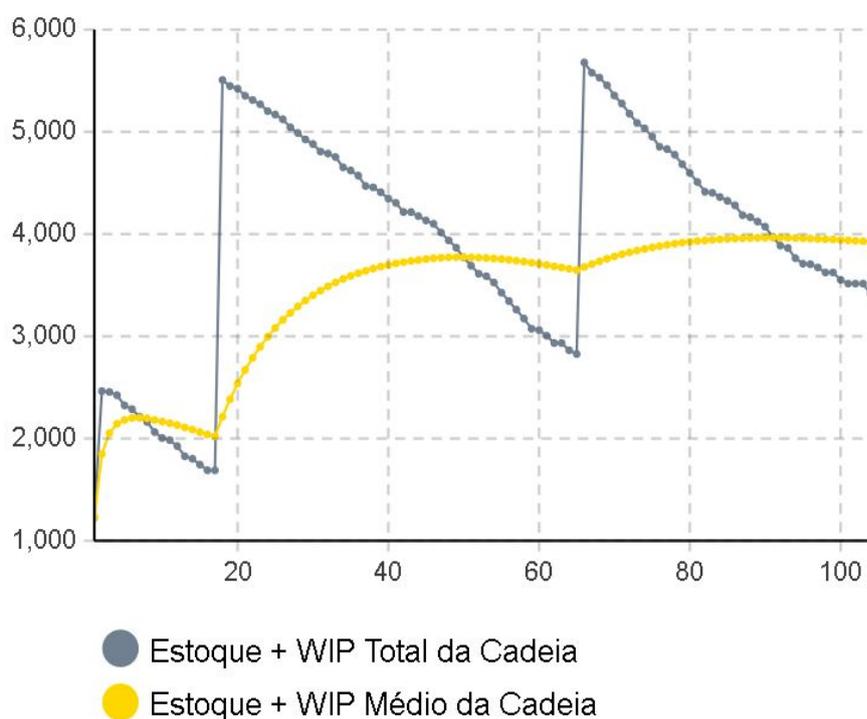
Fonte: Autor (2020)

Figura 94 – Estoque + WIP total da Cadeia - Cenário 13



Fonte: Autor (2020)

Figura 95 – Estoque + WIP total da Cadeia - Cenário 14



Fonte: Autor (2020)

Nesse sentido, comparando os custos totais da cadeia do cenário 7 (que é o melhor cenário até agora) com esses 4 novos cenários, temos que:

Tabela 34 – Custos Totais da Cadeias - Cenários 11, 12, 13 e 14

Cenário	Custo Total da Cadeia
C7	R\$3.102.340,90
C11	R\$3.104.653,78
C12	R\$3.184.477,49
C13	R\$3.622.946,51
C14	R\$4.273.797,75

Fonte: Autor (2020)

Portanto, dentre os 14 cenários testados, permanece o cenário 7 como o cenário que apresenta os melhores resultados em termos de custos totais para a cadeia de suprimentos.

O leitor pode se perguntar nesse momento porque em todos os 14 cenários testados os dados relativos ao abastecimento são os mesmos. Isso se dá porque em todos os cenários, ainda que tenhamos uma variação no curto prazo, as previsões estão certas na média. Dessa forma, em nenhum momento existem rupturas graves na

Tabela 35 – Métricas de Abastecimento - Cenário 15

Total de Pedidos Recebidos	6011
Total de Pedidos Entregues	4785
Taxa de Abastecimento	79,60%
Total Pedidos em Produção + Fila	137
Taxa de Disponibilidade	81,88%
LT Médio de Entrega para o Cliente Final	81,39
Dias Estoque da Fabricante Desabastecido	351

Fonte: Autor (2020)

cadeia que possam fazer os estoques ficarem desabastecidos, dado que os estoques de seguranças permitem que as variações acima da média sejam absorvidas.

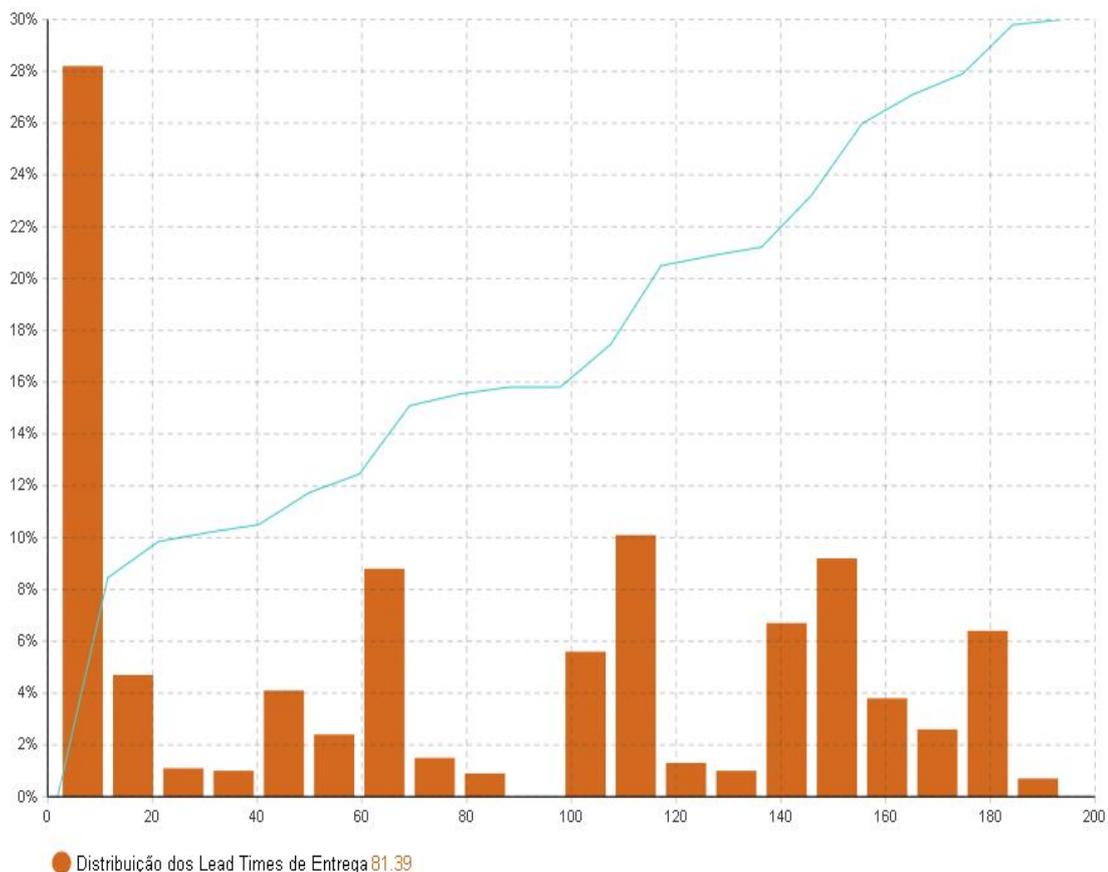
5.4 ANÁLISE DO CENÁRIO 15

Neste cenário, pegaremos o melhor conjunto de parâmetros (R, S) para cada posição de estoque e testaremos qual seria sua performance caso os elos da cadeia entendessem sua demanda como os pedidos da etapa à frente ao invés da demanda do cliente final. Nesse sentido, a fabricante revê sua previsão de demanda com base nos pedidos que recebe do cliente final trimestralmente. Para a fabricante, a previsão de demanda passa a ser a média de pedidos dos últimos três meses e o desvio padrão considerado no dimensionamento do estoque de segurança passa a ser o desvio padrão dos últimos três meses. Da mesma forma, a montadora de placas planejaria reveria a demanda prevista e o desvio padrão dessa demanda com base nas ordens de compra que recebe da fabricante. Por fim, o time de compra de componentes da montadora passa a interpretar sua demanda como as ordens de produção que recebe da fabricante. Por consequência, nesse cenário os parâmetros S e o estoques de segurança variam ao longo da simulação (dado que são funções da demanda média prevista e do desvio padrão, respectivamente).

Em termos de abastecimento, conforme o esperado, há uma forte ruptura no fornecimento por conta das revisões errôneas de todos os membros da cadeia. Os dados de fornecimento estão resumidos na tabela 35.

A figura 97 apresenta a distribuição dos lead times de entrega da fabricante.

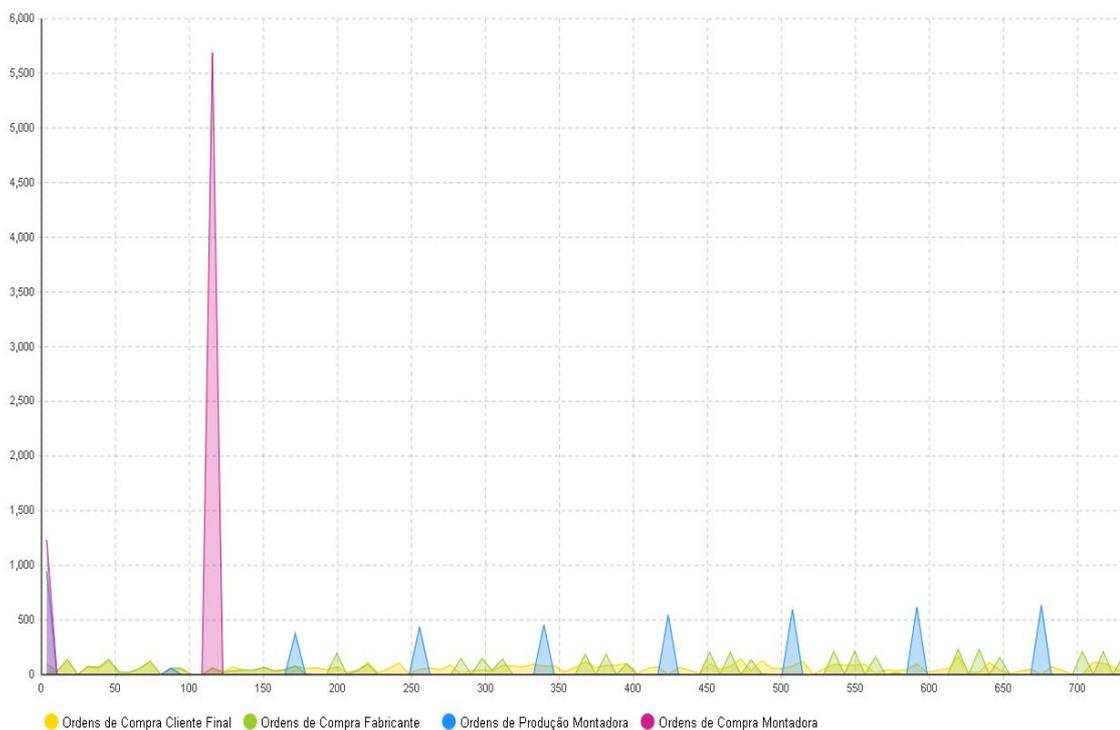
Figura 96 – Distribuição dos lead times de entrega no cenário 15



Fonte: Autor (2020)

A figura 98 traz o comportamento dos pedidos ao longo do período de simulação, o que evidencia bastante o efeito chicote acentuado ocasionado pelas revisões errôneas nas previsões. É importantíssimo saber diferenciar variações randômicas (que é o caso do modelo de simulação) de mudanças no padrão da demanda.

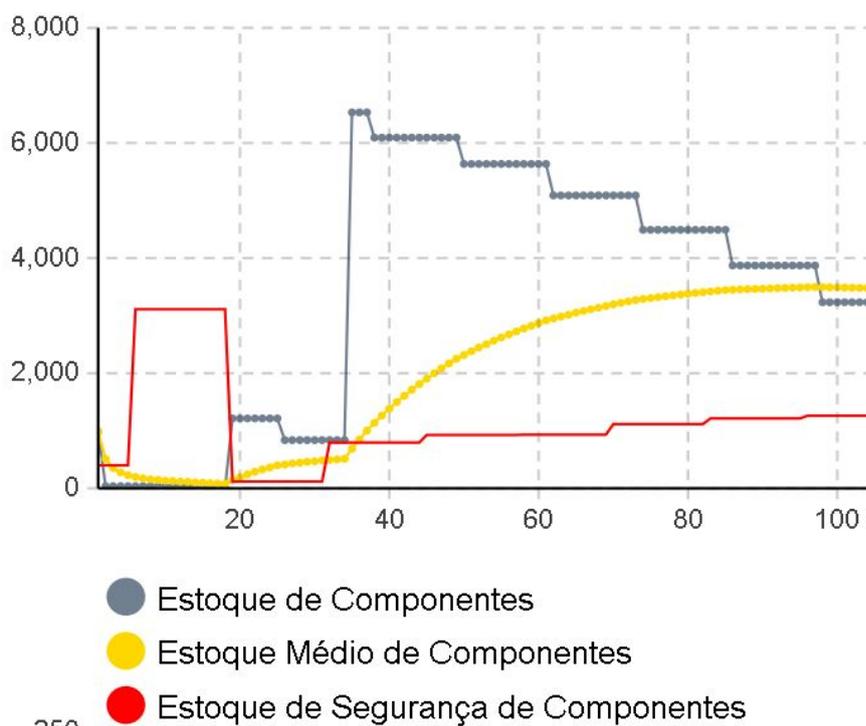
Figura 97 – Efeito Chicote - Cenário 15



Fonte: Autor (2020)

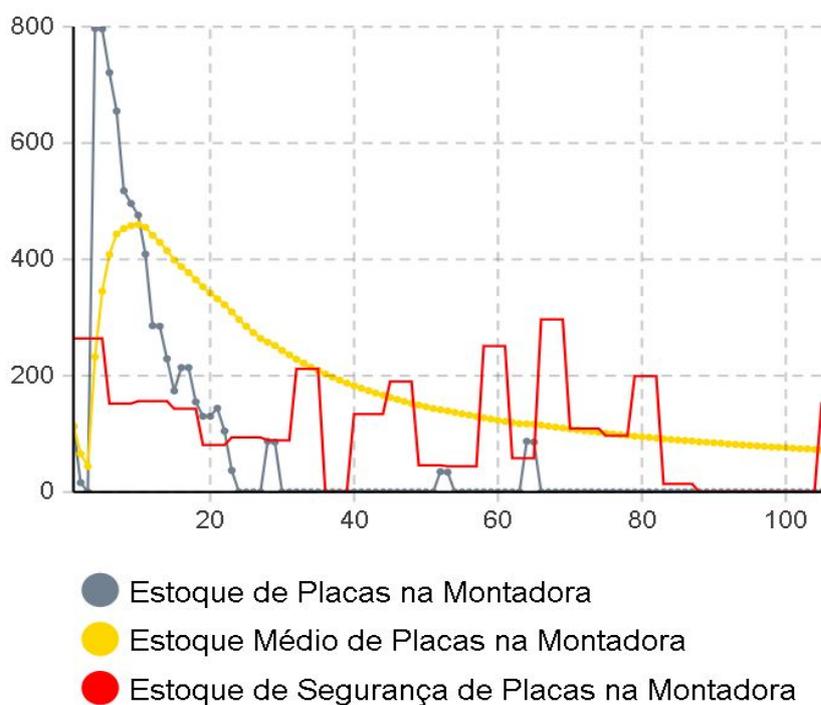
Por fim, nas figuras 99, 100, 101 e 102 temos os dados referentes ao comportamento dos estoques ao longo da simulação.

Figura 98 – Estoque de Componentes - Cenário 15



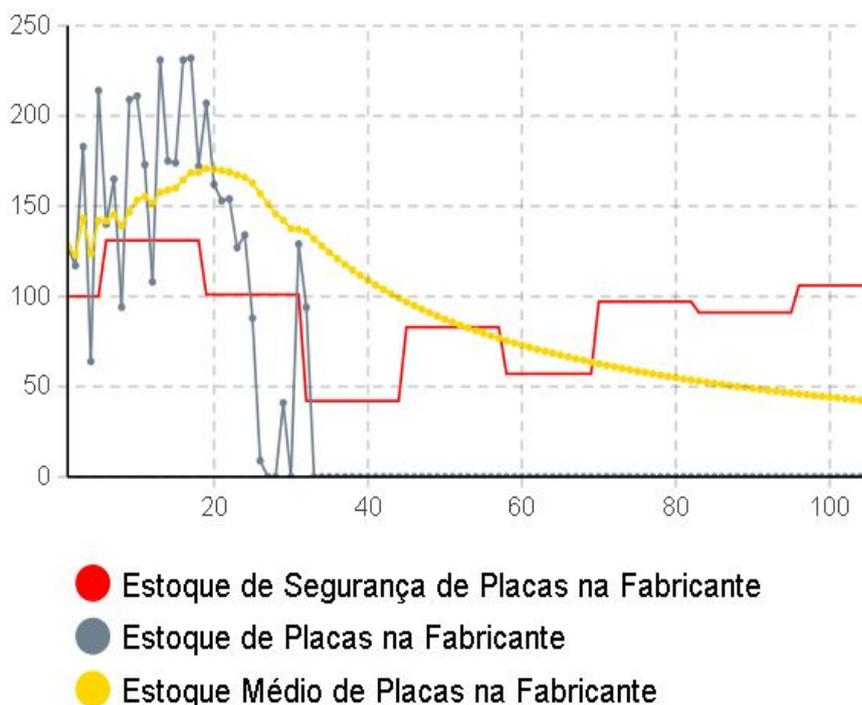
Fonte: Autor (2020)

Figura 99 – Estoque de Placas na Montadora - Cenário 15



Fonte: Autor (2020)

Figura 100 – Estoque de Placas na Fabricante - Cenário 15



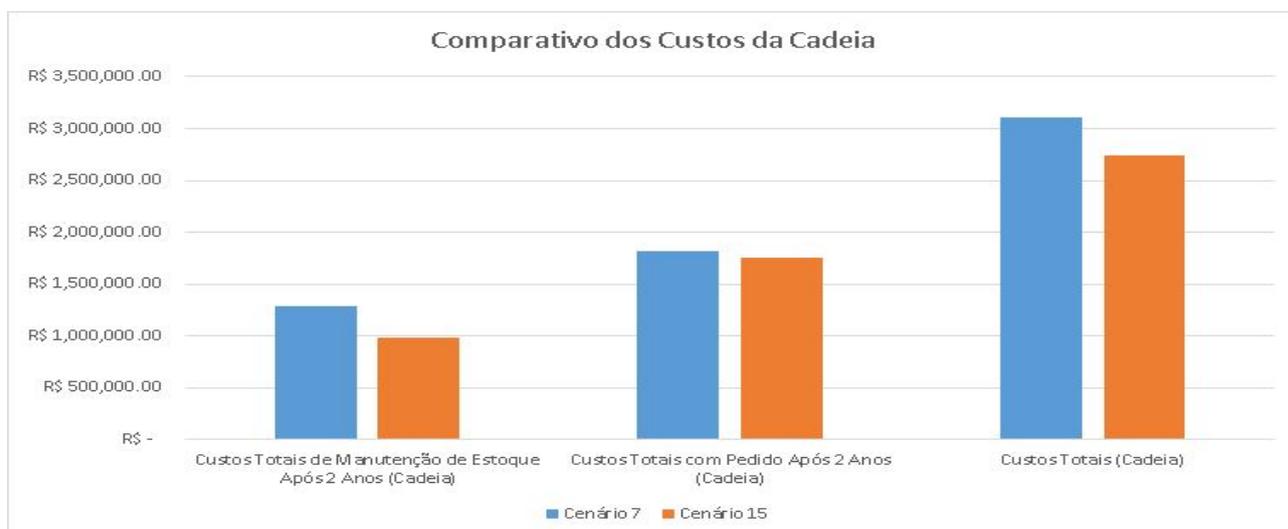
Fonte: Autor (2020)

Vimos, portanto, que cometer o erro de não olhar para a demanda do cliente final além de gerar resultados piores em termos de custos pra cadeia (nesse cenário, os custos totais ficam em R\$4.382.145,94), acaba por ocasionar um nível de serviço extremamente inferior e lead times de entrega totalmente desalinhados com a expectativa do mercado.

5.5 ANÁLISE COMPARATIVA DO CENÁRIO 7 E DO CENÁRIO 16

Tendo encontrado o melhor conjunto (R, S) para cada um dos elos da cadeia, partiremos agora para uma análise que visa responder a uma das questões principais endereçadas por esse trabalho: existirá uma grande diferença no desempenho da cadeia caso a informação de estoque em cada elo fosse compartilhada entre os membros? Quais seriam os resultados caso o estoque à jusante fosse levado em conta na quantidade de estoque em mãos, aumentando assim a posição de estoque dos membros à montante no momento da revisão? A resposta é: sim, levar em conta o estoque de escalão permite que a cadeia experimente uma redução de 11,46% nos custos totais da cadeia sem grandes impactos no abastecimento ao cliente final.

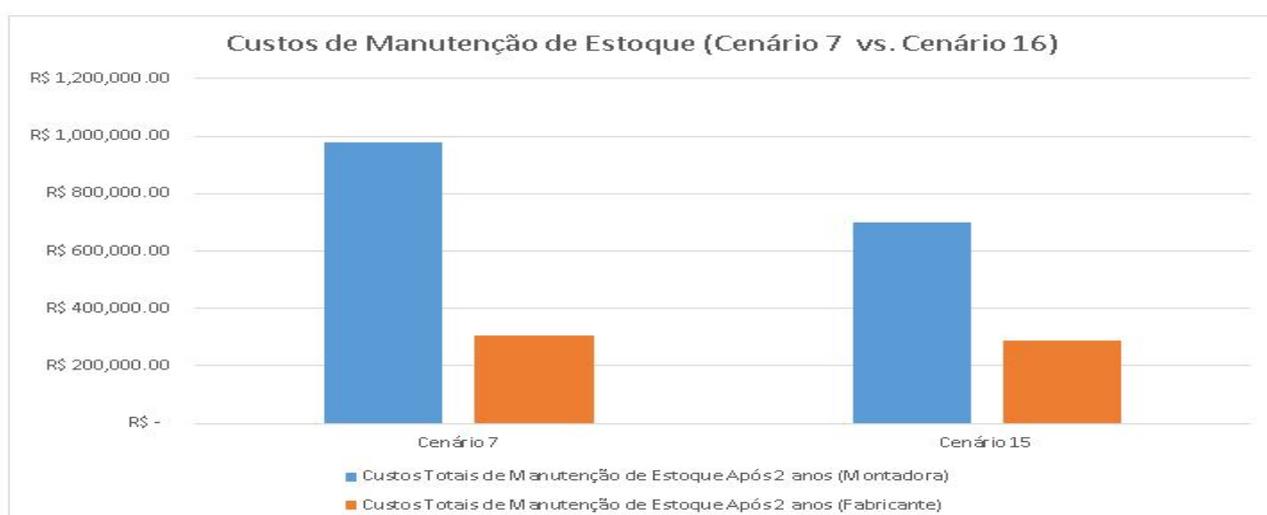
Figura 101 – Comparativo nos Custos da Cadeia - Cenário 7 vs 16



Fonte: Autor (2020)

Esse resultado se dá principalmente pela redução nos custos de manutenção dos estoques, que no cenário 7 são de R\$1.287.360,90 e no cenário 16 ficam em R\$987.917,11, uma redução de 23,26%. Os custos de pedido, por sua vez, tem uma leve redução ocasionada na diminuição das quantidades encomendadas que o cenário 16 tem em relação ao cenário 7. Isso é trivial, dado que ao olhar o estoque à jusante tanto a $Q_{total,oc,montadora}$ quanto a $Q_{total,op,montadora}$ serão menores ao longo dos dois anos de simulação se comparadas ao cenário 7. Desse modo, os custos com pedido experimentam uma redução de 3% no cenário 16 em relação ao cenário 7.

Figura 102 – Custos Manutenção de Estoques - Cenário 7 vs. Cenário 16



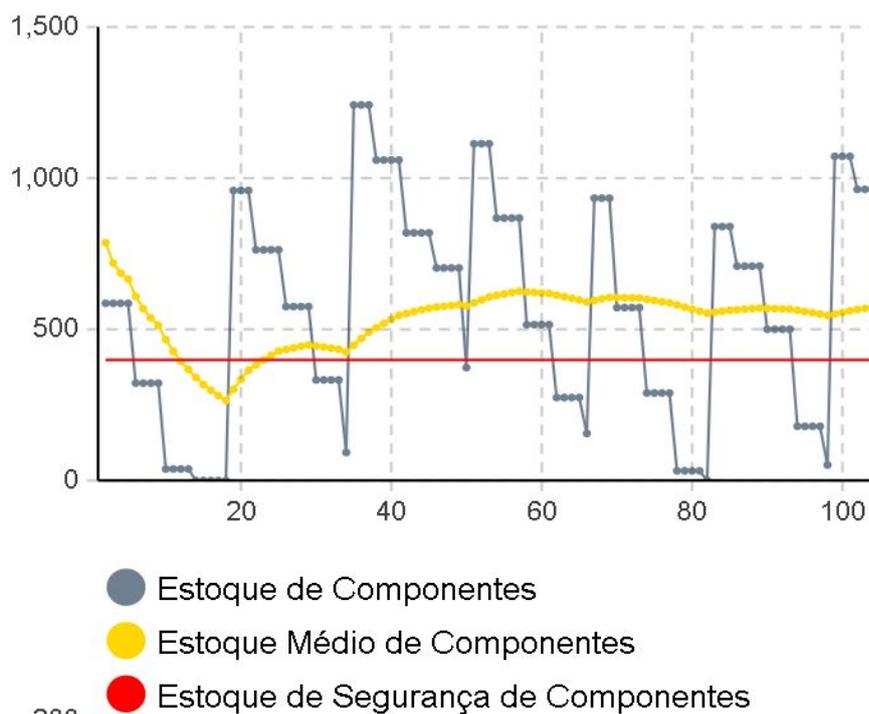
Fonte: Autor (2020)

Fica evidente, portanto, que quem se beneficia com a redução dos custos gera-

das por uma estratégia que olha para o estoque de escalão é justamente a montadora. Isso é intuitivo pois é a montadora quem está à montante da cadeia e é justamente para quem a estratégia faz diferença.

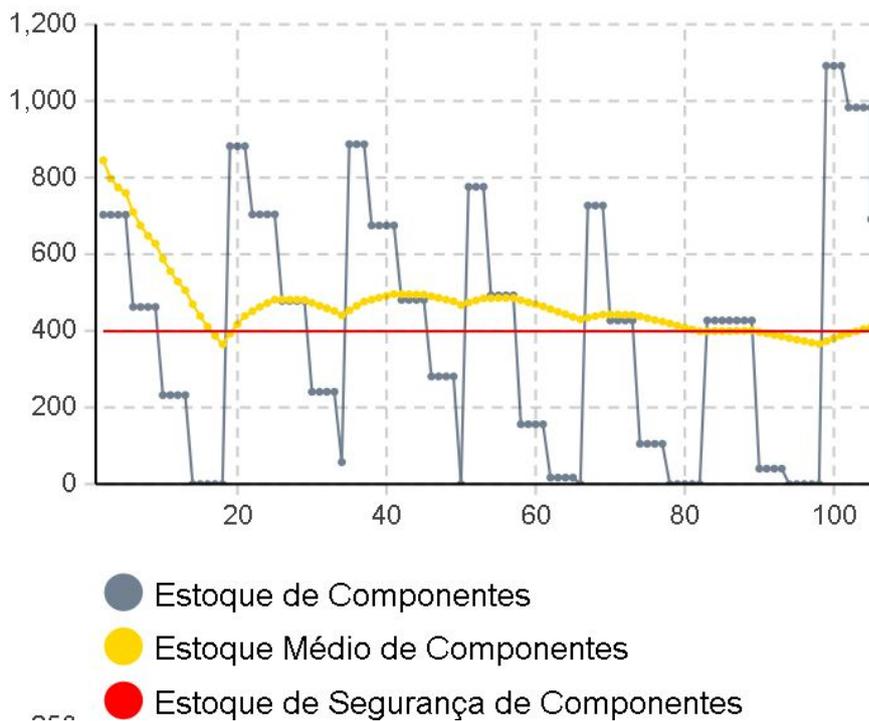
Quando olhamos para o comportamento dos estoques de componentes e de placas em cada cenário, temos conforme as figuras abaixo.

Figura 103 – Estoque de Componentes - Cenário 7



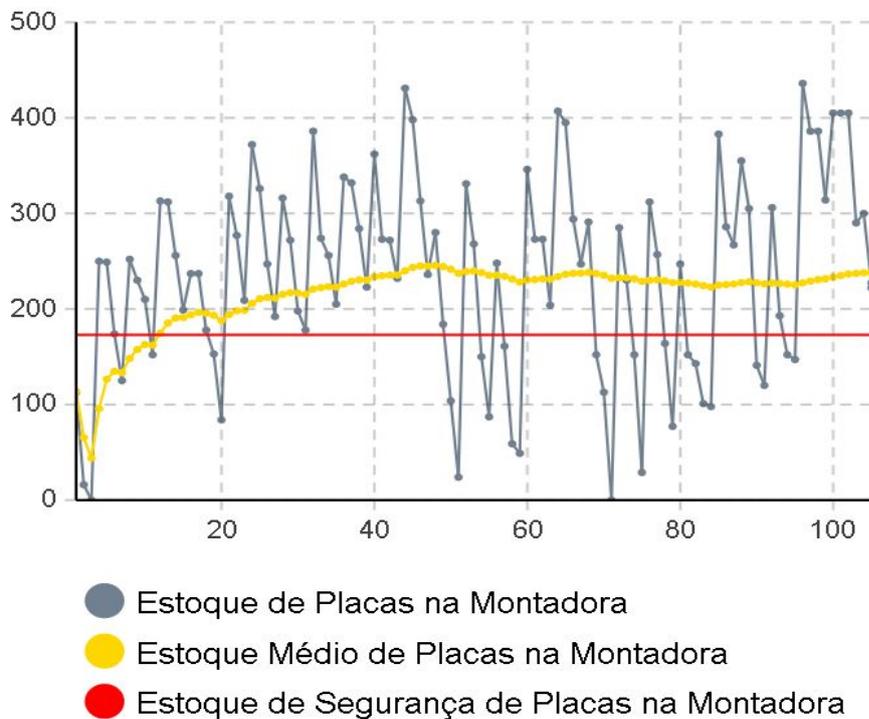
Fonte: Autor (2020)

Figura 104 – Estoque de Componentes - Cenário 16



Fonte: Autor (2020)

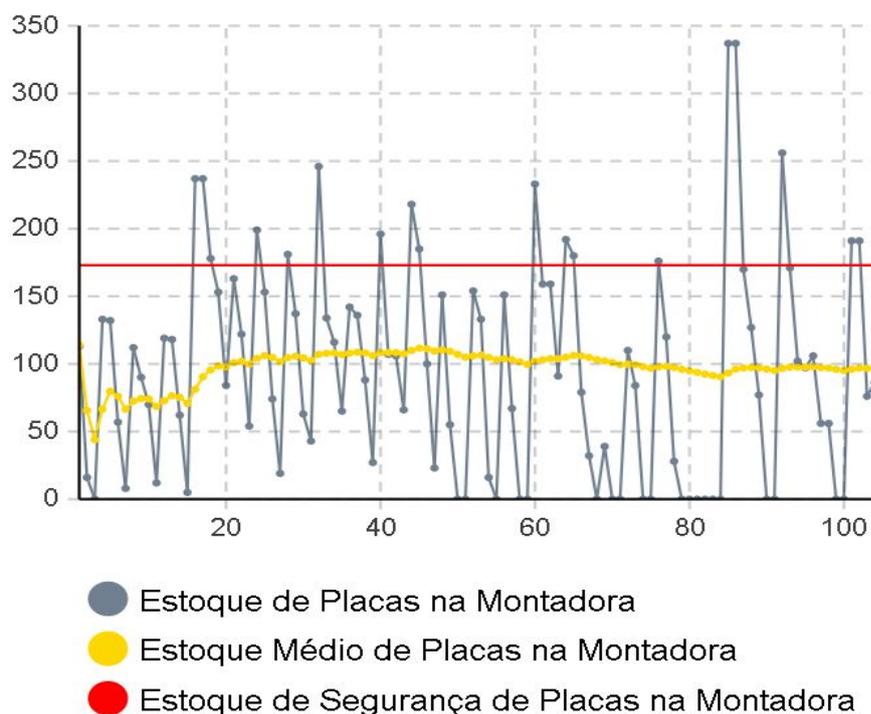
Figura 105 – Estoque de Placas na Montadora - Cenário 7



Fonte: Autor (2020)

Em termos de abastecimento, nesse cenário a o lead time médio de entrega

Figura 106 – Estoque de Placas na Montadora - Cenário 16



Fonte: Autor (2020)

pela fabricante é de 9,67 dias. Há uma leve diferença dado que o estoque da fabricante chega a ficar 11 dias desabastecido durante a simulação. Mesmo com esse fato, o total de pedidos entregues é o mesmo que nos 14 primeiros cenários.

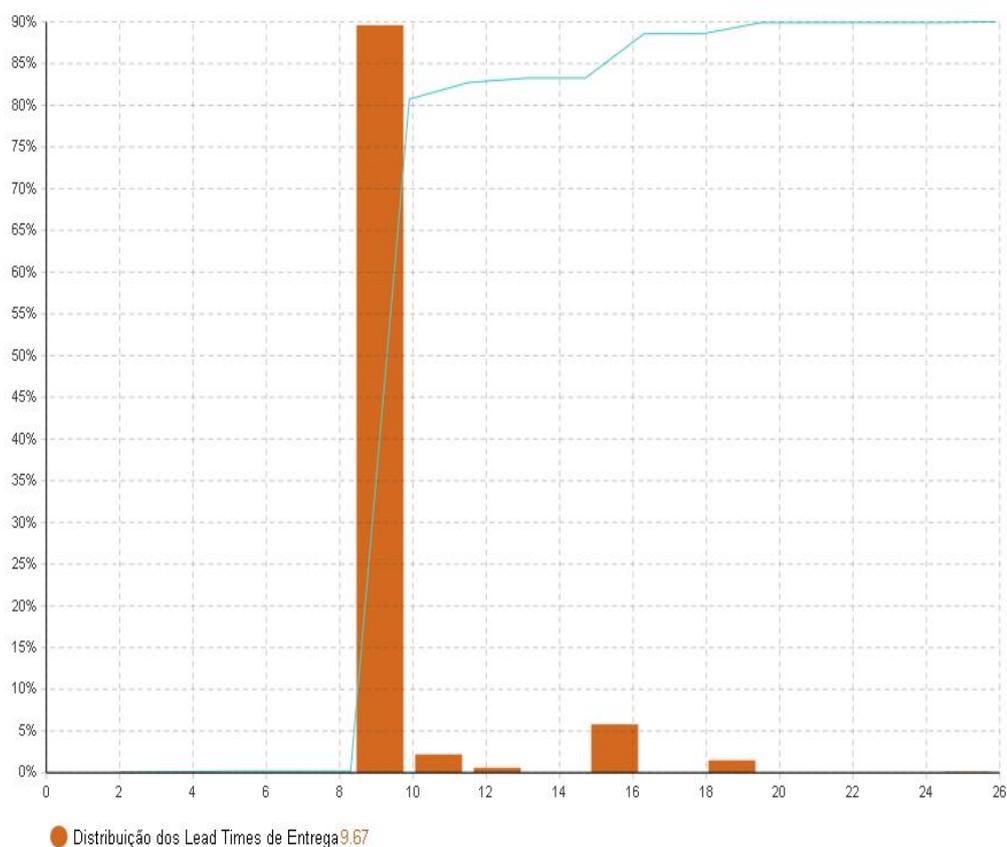
Tabela 36 – Métricas de Abastecimento - Cenário 16

Total de Pedidos Recebidos	6011
Total de Pedidos Entregues	5924
Taxa de Abastecimento	98,55%
Total Pedidos em Produção + Fila	87
Taxa de Disponibilidade	100%
LT Médio de Entrega para o Cliente Final	9,67
Dias Estoque da Fabricante Desabastecido	11

Fonte: Autor (2020)

Na figura abaixo temos a distribuição dos lead times de entrega da fabricante no cenário 16.

Figura 107 – Distribuição dos lead times de entrega no cenário 16



Fonte: Autor (2020)

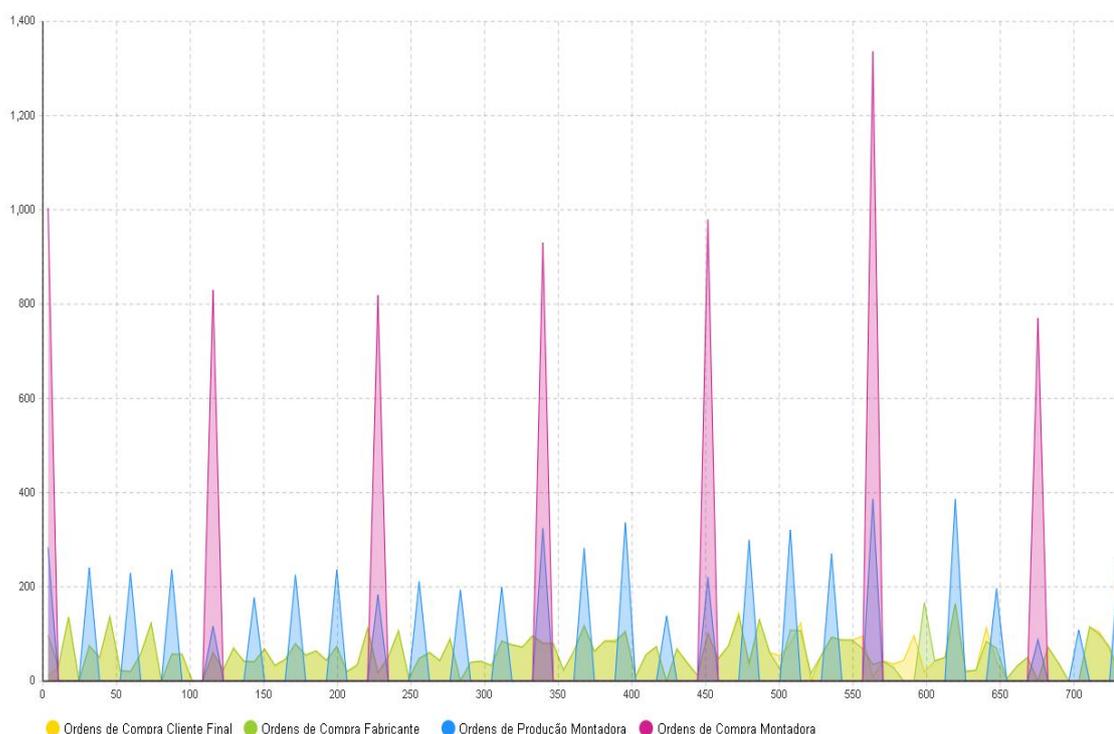
Abaixo temos a tabela que compara os resultados em termos de totais de unidades encomendadas por cada elo e a variabilidade dos pedidos.

Tabela 37 – Métricas de Pedido e Efeito Chicote - Cenário 16

Métrica	C7	C16
$(Q_{total,cliente})$	6011	6011
$(Q_{total,oc,fab.})$	6011	6011
$(Q_{total,op,mon.})$	6407	6198
$(Q_{total,oc,mon.})$	7119	6673
$(CV_{oc,cliente})$	67,78%	67,78%
$(CV_{oc,fabricante})$	66,29%	69,68%
$(CV_{op,montadora})$	184,43%	187,12%
$(CV_{oc,montadora})$	382,08%	382,08%

Fonte: Autor (2020)

Figura 108 – Efeito Chicote - Cenário 16



Fonte: Autor (2020)

Em resumo, considerar os estoques à jusante na posição de estoque permite que a cadeia experimente uma substancial redução em seus custos com um impacto praticamente nulo no abastecimento.

Tabela 38 – Custos Totais da Cadeia - Cenários 7 e 16

Cenário	Custo Total da Cadeia
C7	R\$3.102.340,90
C16	R\$2.746.767,11

Fonte: Autor (2020)

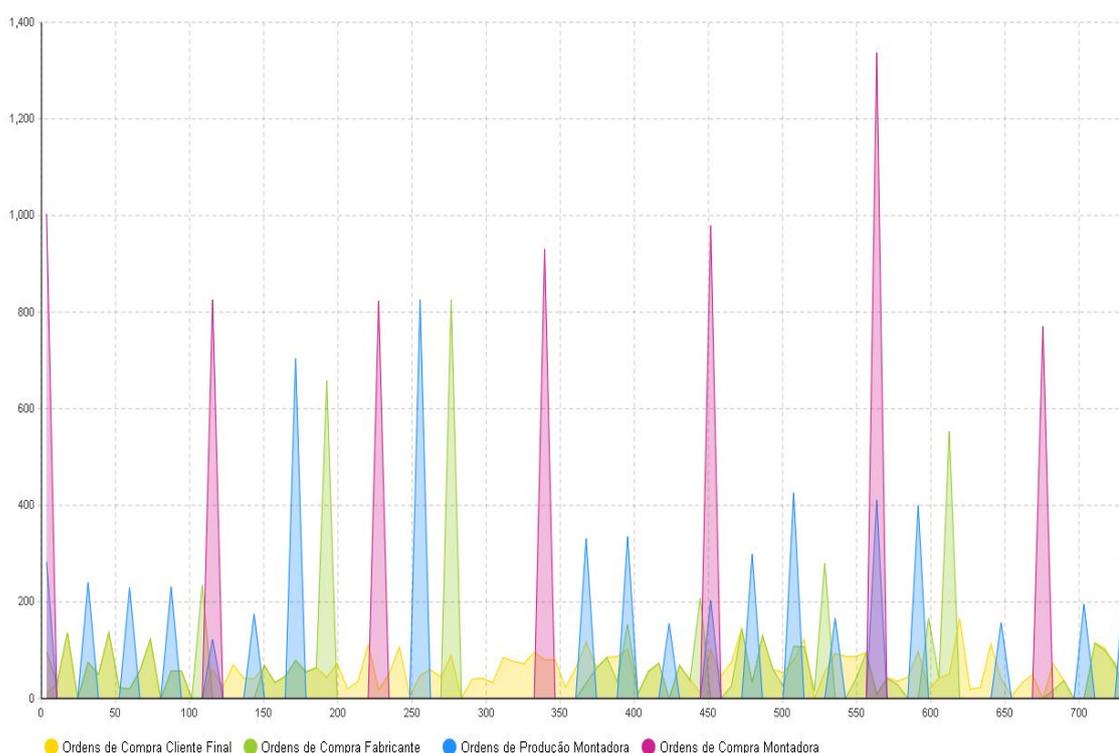
5.6 ANÁLISE COMPARATIVA DO CENÁRIO 16 DO CENÁRIO 17

Por fim nesse cenário analisamos quais os efeitos que um contrato de comprometimento mínimo teria sobre a cadeia. Visando conciliar melhor possíveis conflitos de interesse, testamos o cenário em que a montadora oferece um contrato de comprometimento mínimo em que a fabricante se compromete em levar todo o estoque da montadora a cada trimestre em forma de placas montadas. Nesse sentido, a montadora se antecipa e produz as placas 2 semanas antes do comprometimento da fabricante.

Pegaremos portanto, o cenário mais eficiente (que é o cenário 16) dentre todos os testados e veremos quais são os efeitos de um contrato de comprometimento mínimo.

Surpreendentemente, um contrato de comprometimento mínimo além de dividir melhor o ônus da operação, permite inclusive uma leve melhoria no desempenho da cadeia. Neste cenário, os custos totais da cadeia ficam em R\$2.723.872,08, uma melhoria irrisória de 0,8% em relação ao cenário 16. Embora os custos com manutenção de estoque tenham uma leve piora (dado que agora placas que antes ficariam por mais tempo no estoque da montadora agora vão ficar no estoque da fabricante, onde as placas tem maior valor agregado), os custos com pedido tem uma leve redução de um cenário para o outro. Isso se deve ao fato de que a montadora passa a processar lotes maiores ao fim de cada trimestre, gerando menos ordens de produção ao longo da simulação, e portanto menores custos. Podemos conferir esse comportamento nas ordens comparando as imagens 110 e 111. Note que as ordens de produção, em azul, passam a ser menos frequentes, com picos no fim de cada trimestre.

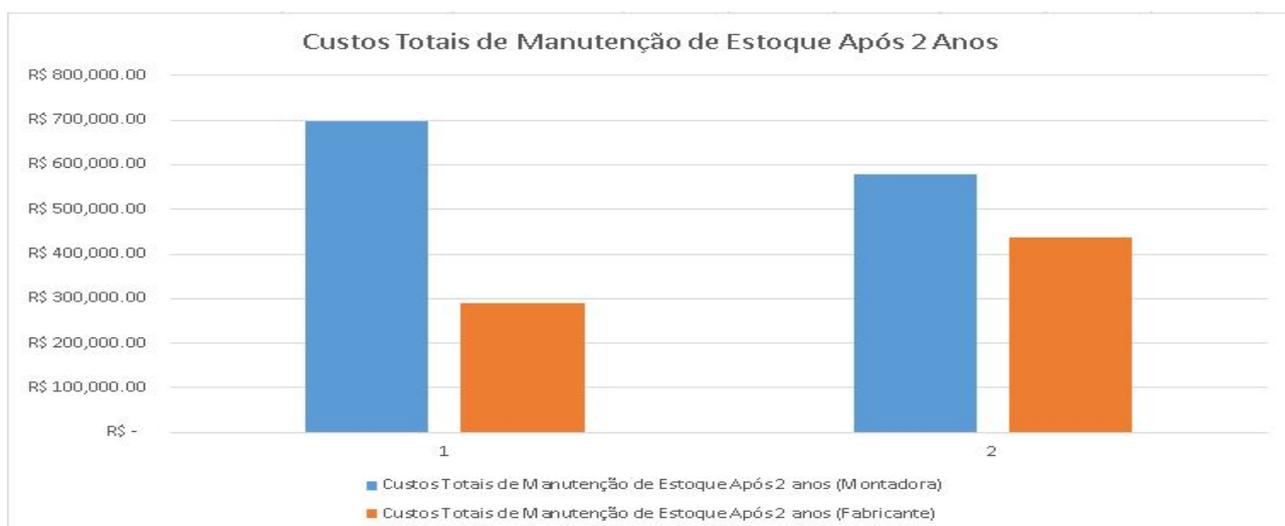
Figura 109 – Efeito Chicote - Cenário 17



Fonte: Autor (2020)

Quando olhamos, no entanto, para a divisão dos custos de manutenção dos estoques, vemos que a montadora enfrenta uma redução de 17,08% enquanto a fabricante experimenta um aumento de 51,59%.

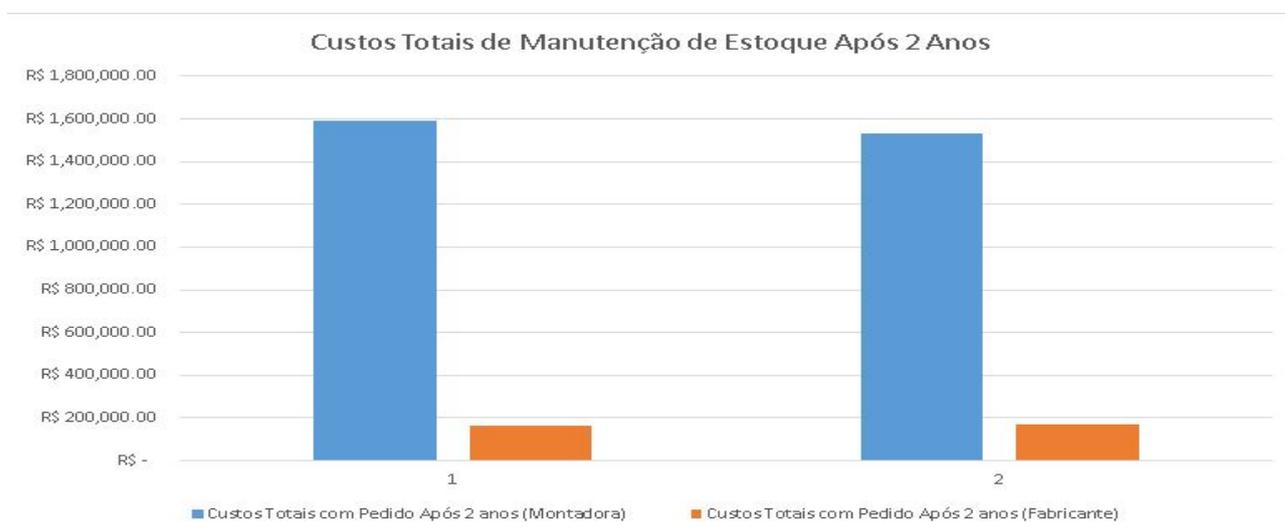
Figura 110 – Custos Manutenção de Estoques - Cenário 16 vs. Cenário 17



Fonte: Autor (2020)

No que tange aos custos com pedido, os custos com importação se mantêm basicamente constantes, no entanto, os custos de produção enfrentam uma redução de 10,54% de um cenário para o outro. Para a fabricante, no entanto, os custos com pedidos (transporte) tem um leve aumento de 4,5%.

Figura 111 – Custos Totais com Pedido - Cenário 16 vs. Cenário 17



Fonte: Autor (2020)

Os dados referentes ao abastecimento são exatamente os mesmos que no cenário 16. Mesmo com um aumento nos custos totais para a fabricante, a diminuição nos custos totais para a montadora acaba por ser maior de forma que os custos totais da cadeia são ligeiramente menores. Podemos dizer, portanto, que o contrato pode ajudar a amenizar o conflito de interesse entre a montadora, que arca com os custos

mais relevantes da cadeia principalmente por conta das importações e das produções, que tem custos fixos maiores, além do fato de ter que arcar com maiores custos de manutenção dos estoques por conta dos alto lead times dos componentes.

5.7 ANÁLISE DO CENÁRIO 18

Vimos que, com exceção do cenário 15, em que existem revisões da previsão de demanda com base nos pedidos recebidos da etapa à jusante, os dados referentes ao abastecimento são iguais ou praticamente iguais em todos os outros 16 cenários. Vimos que isso se deve ao fato de que embora existam variações aleatórias no curto prazo, todas as previsões estão corretas na média. Testamos portanto, um cenário em que a demanda média aumenta em 10% a cada três meses, mantendo o coeficiente de variação em 75%. Ou seja, a variabilidade aleatória se mantém a mesma, porém existe uma tendência de crescimento na demanda ao longo do tempo. Fica então, a pergunta: caso de fato existissem variações não aleatórias (como por exemplo, uma tendência de crescimento na demanda) que alterassem a distribuição da demanda ao longo da simulação, a cadeia conseguiria manter o nível de serviço desejado para o cliente final? A resposta é um sonoro não. Com a tendência de aumento na demanda, os dados de abastecimento para esse cenário são dados na tabela 39.

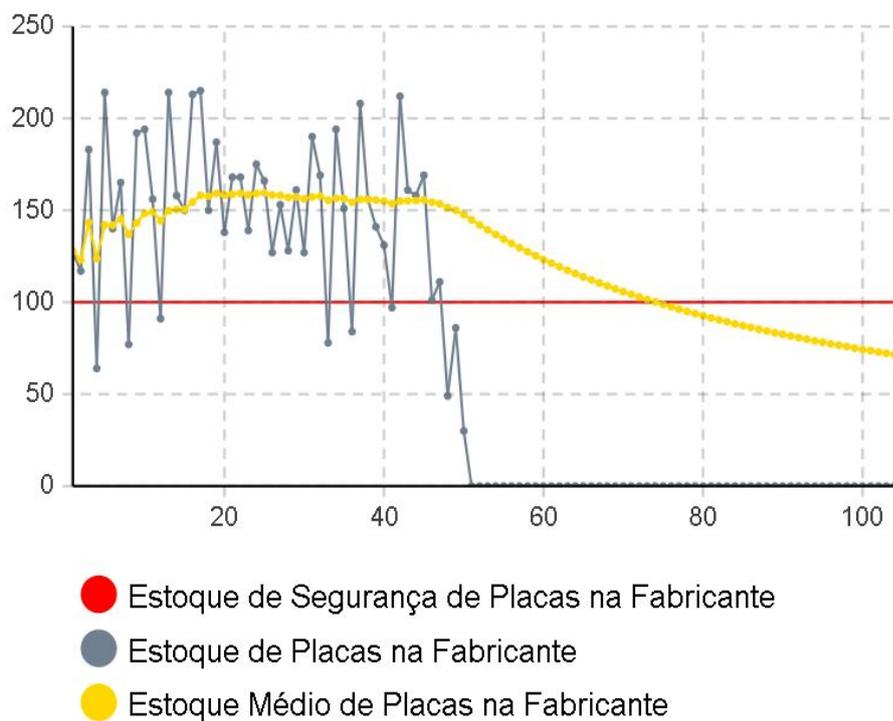
Tabela 39 – Métricas de Abastecimento - Cenário 18

Total de Pedidos Recebidos	8548
Total de Pedidos Entregues	6942
Taxa de Abastecimento	81,21%
Total Pedidos em Produção + Fila	115
Taxa de Disponibilidade	83%
LT Médio de Entrega para o Cliente Final	49,61
Dias Estoque da Fabricante Desabastecido	132

Fonte: Autor (2020)

Podemos ver na figura 112 que o estoque da fabricante é zero a partir da semana 50 da simulação, que é quando a fabricante passa a ter tantos pedidos atrasados que todas as unidades que entram em estoque fluem diretamente para a produção.

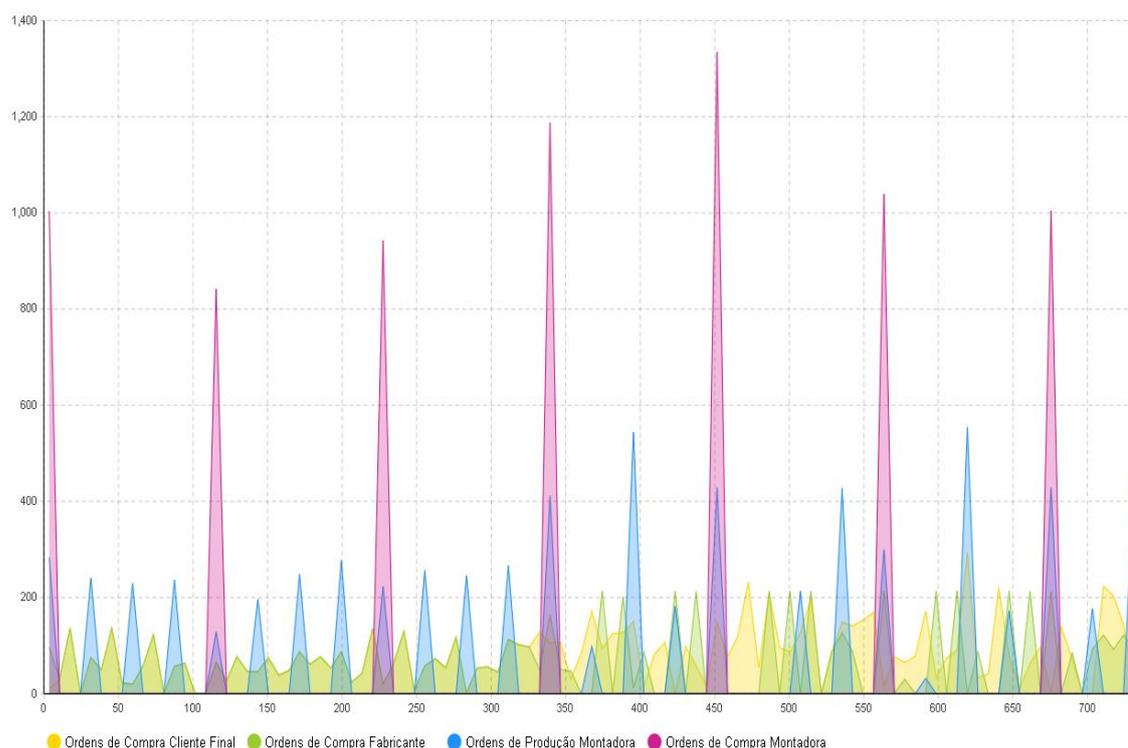
Figura 112 – Estoque de Placas na Montadora - Cenário 18



Fonte: Autor (2020)

A figura abaixo apresenta a variabilidade dos pedidos no cenário 18.

Figura 113 – Efeito Chicote - Cenário 18



Fonte: Autor (2020)

Podemos concluir, portanto, que é essencial que as firmas saibam diferenciar as variações aleatórias de tendências e sazonalidades na demanda e consigam utilizar dessa informação de maneira adequada para revisar seus planos. Futuros trabalhos poderiam incorporar modelos preditivos em conjunto do modelo de simulação e testar cenários mais realistas no que tange ao comportamento da demanda.

6 CONCLUSÃO

Vimos ao longo da monografia os desafios, complexidades e principais trade-offs que a gestão de estoques visa endereçar e como os problemas se tornam mais complexos à medida que premissas mais simples passam a ser relaxadas. Quando olhamos para a gestão de estoques em um contexto de várias empresas com objetivos conflitantes, em que os efeitos da decisão de um elo da cadeia tem impacto direto nos outros elos da cadeia, os problemas de coordenação emergem. Dada a complexidade e inviabilidade prática de se modelar e resolver analiticamente problemas de estoque multi-nível, com mecanismos de coordenação como compartilhamento de informação e contratos e com uma demanda estocástica, foi utilizada a técnica da simulação de eventos discretos para endereçar a problemática da monografia. Com a simulação foram testados 18 cenários, dos quais os 14 primeiros foram executados visando encontrar os melhores parâmetros (R, S) para cada elo da cadeia de suprimentos, olhando tanto para métricas referentes ao abastecimento quanto métricas referentes ao desempenho de custos da cadeia de suprimentos. Os outros 4 cenários visam responder à perguntas específicas levantadas no trabalho, relacionadas aos efeitos de desconsiderar a demanda do cliente final nas previsões e dimensionamento dos estoques de segurança, às melhorias de eficiência atingidas ao se levar em conta o estoque de escalão, à amenização dos conflitos de interesse através de contratos e por fim ao impacto que mudanças na distribuição da demanda podem gerar na cadeia de suprimentos. Os resultados obtidos pelo trabalho indicam que embora o aumento de lotes (de produção ou compra) seja desejável sob um ponto de vista de se reduzir os custos com pedidos, há de se levar em conta não apenas os custos de manutenção dos estoques (que intuitivamente tendem a aumentar com o aumento dos lotes) mas também o efeito chicote gerado por esse aumento de lotes. A simulação pode evidenciar que quando etapas à jusante aumentam drasticamente os tamanhos de lote, o efeito chicote se propaga ao longo da cadeia, aumentando não apenas a variabilidade das ordens mas também a quantidade total de ordens realizadas ao longo dos dois anos de simulação, o que acaba inclusive por aumentar os custos com pedido, dado que o mesmo é função do tamanho dos lotes. Nesse sentido, foi encontrado que os melhores resultados se dão para quando os períodos entre revisões para compras de componentes na montadora, os períodos entre revisões para a produção de placas e os períodos de revisões para as compras de placas pela fabricante são 16 semanas, 4 semanas e 1 semana, respectivamente.

Vimos também, que quando os membros à montante da cadeia de suprimentos passam a interpretar a demanda como os pedidos que recebem do elo à frente, o efeito chicote acaba por ser devastador. Dois erros cruciais são cometidos aqui: primeiramente, interpretar os pedidos que recebe da etapa a frente como a demanda significa

estar suscetível às variabilidades "artificiais" que podem ser geradas pelas etapas à frente do sistema, que tende a se propagar ao longo da cadeia. Por outro lado, é imprescindível que as firmas saibam diferenciar variações aleatórias de mudanças reais nos padrões da demanda. Quando esses erros são cometidos, os resultados em termos de abastecimento são devastadores para a cadeia, tendo o lead time médio chegando a 81,39 dias, muito além da expectativa do mercado que é de receber os switches em duas semanas. Por outro lado, quando a informação do estoque de cada membro e da demanda do cliente final é compartilhada entre os membros da cadeia, os custos de manutenção de estoques tendem a diminuir expressivamente. Os resultados obtidos após dois anos de simulação mostram que uma redução de 11,46% nos custos totais é obtida apenas ao se considerar os estoques à jusante na posição de estoque (o estoque de escalão, que é todo estoque entre um ponto da cadeia e o cliente final), o que faz com que a cadeia consiga operar com menor quantidade de estoque.

Quando comparamos o melhor cenário, que envolve os estoques de escalão, com um cenário em que os estoques de escalão são levados em conta e existe um contrato de comprometimento mínimo onde a fabricante de switches se compromete a levar os saldos em estoque na montadora trimestralmente, vimos que neste cenário com a existência de contrato os conflitos de interesse podem ser melhor gerenciados e o ônus da operação pode ser levemente repassado à fabricante. A montadora de placas enfrenta altos custos de pedido com a importação e a produção ao mesmo tempo que enfrenta maiores níveis de estoque, principalmente por conta dos altos lead times de fornecimento de componentes. Nesse sentido, quando o estoque é "empurrado" para a fabricante trimestralmente, os custos de manutenção com os estoques passam a ser amenizados para a montadora sem degradações no desempenho de custos totais para a cadeia. Pelo contrário, neste cenário vimos que os custos totais da cadeia são inclusive levemente reduzidos para a cadeia de suprimentos por conta das reduções nos custos com produção pela montadora, que agora passa a processar lotes de produção maiores no fim de cada trimestre.

Por fim, vimos que os resultados em termos de abastecimento foram iguais em praticamente todos os cenários analisados (e dentro das expectativas do mercado). Vimos que isso se deve ao fato de que nesses cenários os elos da cadeia interpretam a demanda como a demanda do cliente final e não os pedidos que recebe da etapa à frente. Como todos os elos acertam as previsões na média e dimensionam corretamente seus estoques de segurança de acordo com o desvio padrão da demanda (afinal, eles dimensionam suas previsões e estoques de segurança em total consonância com o processo aleatório de geração de demanda), não existem rupturas no fornecimento e nem picos de demanda que não sejam absorvidos pelo sistema. No entanto, quando a distribuição de demanda varia com uma tendência de crescimento ao longo da simulação, é necessário que as firmas passem a rever suas previsões de demanda e

consequentemente seus estoques de segurança e o parâmetro S , que é função da demanda média prevista. Sem essa revisão, vimos que a ruptura no fornecimento aumenta os lead times médios de entrega para o cliente final expressivamente, chegando a 49,61 dias, o que é muito acima da expectativa do mercado.

Podemos resumir as conclusões do estudo em:

- O aumento dos períodos entre revisões na etapa mais à montante da cadeia (que é a compra de componentes pela montadora) tende a enfrentar o trade-off entre custos de pedido e custos com estoque, e por conta disso é necessário encontrar um ponto que minimize os custos totais;
- Para as etapas mais à jusante, seja produção de placas pela montadora ou a compra de placas pela fabricante, o aumento nos períodos de revisões não traz apenas o trade-off entre os custos com pedido e custos manutenção de estoques, mas também traz o efeito chicote e o efeito de "puxar" lotes maiores para as etapas mais à jusante da cadeia. Pedidos grandes das etapas mais à frente diminuem drasticamente as posições de estoque das etapas atrás, e para atender esses pedidos elas precisam processar pedidos cada vez maiores também;
- Compartilhamento de informação (como por exemplo, o estoque disponível em cada elo e a demanda do cliente final) são essenciais para que a cadeia de suprimentos possa operar com um melhor nível de eficiência de custos;
- Rever as previsões de demanda e por consequência nos estoques de segurança nos parâmetros S só é necessário caso sejam percebidas variações não aleatórias no padrão da demanda, ou seja, mudanças na distribuição da demanda. Ainda sim, é necessário que as considerações de demanda reflitam a demanda do cliente final e não os pedidos recebidos das etapas à jusante. Realizar previsões com base nos pedidos que recebe tende a acentuar o efeito chicote e causar rupturas no fornecimento da cadeia. Por outro lado, não saber diferenciar as variações aleatórias de mudanças na distribuição da demanda para se planejar de acordo com os novos padrões de demanda também tende a causar rupturas drásticas no fornecimento;
- Contratos de comprometimento mínimo podem dividir melhor o ônus da cadeia sem impactar a performance da cadeia.

Futuros trabalhos poderiam incorporar tendências e sazonalidades na distribuição da demanda na simulação de forma a representar cenários mais realistas do comportamento da demanda. Nesse sentido, poderiam ser incorporados modelos híbridos de previsão e simulação, onde os membros da cadeia passariam a rever suas

políticas de estoque com base nas previsões geradas pelos modelos preditivos. Poderiam ser testadas uma série de outras estruturas de contrato, como por exemplo descontos por quantidade e flexibilidade. Além disso, futuros trabalhos poderiam incorporar aleatoriedade no processo de fornecimento de componentes, limitação de capacidade na montadora. Futuros trabalhos também poderiam incluir aspectos referentes ao **life cycle** do produto bem como aspectos referentes aos aspectos financeiros e restrições de orçamento.

REFERÊNCIAS

- AGGARWAL, Sumer C. A review of current inventory theory and its applications. **International Journal of Production Research**, v. 12, n. 4, p. 443–482, 1974. ISSN 1366588X. DOI: 10.1080/00207547408919568.
- ARSHINDER; KANDA, Arun; DESHMUKH, S. G. Supply chain coordination: Perspectives, empirical studies and research directions. **International Journal of Production Economics**, v. 115, n. 2, p. 316–335, 2008. ISSN 09255273. DOI: 10.1016/j.ijpe.2008.05.011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: Informação e documentação — Citações em documentos — Apresentação. Rio de Janeiro, ago. 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: Informação e documentação — Referências — Apresentação. Rio de Janeiro, ago. 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6027**: Informação e documentação — Sumário — Apresentação. Rio de Janeiro, dez. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6028**: Informação e documentação — Resumo — Apresentação. Rio de Janeiro, nov. 2003.
- AXSATER, Sven. **Inventory Control**. [S.l.: s.n.], 2006. P. 326. ISBN 0-387-33250-2 (HB). Disponível em: <https://www.amazon.com/Inventory-International-Operations-Research-Management/dp/0387332502>.
- BALLOU, Ronald H.; GILBERT, Stephen M.; MUKHERJEE, Ashok. New managerial challenges from supply chain opportunities. **IEEE Engineering Management Review**, v. 28, n. 3, p. 7–16, 2000. ISSN 03608581. DOI: 10.1016/S0019-8501(99)00107-8.
- BANKS, Jerry. **Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice**. [S.l.: s.n.], 1998. P. 528. ISBN 0-471-13403-1. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Handbook-Simulation-Principles-Methodology-Applications/dp/0471134031>.
- BORSHCHEV, Andrei. **The Bigbook of Simulation Modeling**. [S.l.: s.n.], 2013. v. 68, p. 397–402.
- BRADLEY, Stephen P.; HAX, Arnoldo C.; MAGNANTI, Thomas L. **Mathematical Programming: An Overview**. [S.l.: s.n.], 1977. v. 68.
- BUSHUEV, Maxim A. *et al.* A review of inventory lot sizing review papers. **Management Research Review**, v. 38, n. 3, p. 283–298, 2015. ISSN 20408269. DOI: 10.1108/MRR-09-2013-0204.

CACHON, Gerard; TERWIESCH, Christian. Matching Supply with Demand: An Introduction to Operations Management, p. 528, 2012. Disponível em: <http://www.amazon.com/Matching-Supply-Demand-Introduction-Operations/dp/0073525200>.

CACHON, Gérard P. Supply Chain Management: Design, Coordination and Operation. **Handbooks in Operations Research and Management Science**, v. 11, p. 227–339, 2003. ISSN 09270507. DOI: 10.1016/S0927-0507(03)11006-7. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927050703110067>.

CHEN, Jing; ZHANG, Hui; SUN, Ying. Implementing coordination contracts in a manufacturer Stackelberg dual-channel supply chain. **Omega**, Elsevier, v. 40, n. 5, p. 571–583, 2012. ISSN 0305-0483. DOI: 10.1016/j.omega.2011.11.005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2011.11.005>.

CHOPRA, Sunil; MEINDL, PETER. **Supply Chain Management Strategy, Planning, and Operation**. [S.l.: s.n.], 2012. P. 528. ISBN 9780133800203. Disponível em: <http://www.pearsoned.co.uk/bookshop/detail.asp?item=100000000445856>.

CLARK, Andrew J.; SCARF, Herbert. Optimal policies for a multi-echelon inventory problem. **Management Science**, v. 50, 12 SUPPL., p. 1782–1795, 2004. ISSN 00251909. DOI: 10.1287/mnsc.1040.0265.

DRAKE, Matthew J.; MARLEY, Kathryn A. A century of the EOQ. **International Series in Operations Research and Management Science**, v. 197, p. 3–22, 2014. ISSN 08848289. DOI: 10.1007/978-1-4614-7639-9_1.

FULBRIGHT, John E. Advantages and Disadvantages of the EOQ Model. **Journal of Purchasing and Materials Management**, v. 15, n. 1, p. 8–10, 1979. ISSN 1745-493X. DOI: 10.1111/j.1745-493x.1979.tb00616.x.

GROOTE, Xavier De. Flexibility and product variety in lot-sizing models. **European Journal Of Operational Research**, v. 75, p. 264–274, 1994.

GÜMÜS, A. Taskin; GÜNERI, A. Fuat. Multi-echelon inventory management in supply chains with uncertain demand and lead times: Literature review from an operational research perspective. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 221, n. 10, p. 1553–1570, 2007. ISSN 09544054. DOI: 10.1243/09544054JEM889.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J. **Introduction to Operations Research**. [S.l.: s.n.], 2014. P. 914. ISBN 9780073523453. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Introduction-Operations-Research-Frederick-Hillier/dp/0078414474>.

LA LONDE, Bernard; MASTERS, James. Emerging Logistics Strategies: blueprints for the next century identifying key logistics strategies. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 24, n. 7, p. 35–47, 1994.

LAMBERT, Douglas M.; STOCK, James R.; ELLRAM, Lisa M. **Fundamentals of Logistics Management**. [S.l.: s.n.], 1998. P. 595. ISBN 0-256-14117-7. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/Fundamentals_of_Logistics_Management.html?id=K8xXAAAAYAAJ&redir_esc=y.

LEE, Hau L.; PADMANABHAN, V.; WHANG, Seungjin. Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect. **Management Science**, v. 50, 12 SUPPL., p. 1875–1886, 2004. ISSN 00251909. DOI: 10.1287/mnsc.1040.0266.

MALONE, Thomas W.; CROWSTON, Kevin. The Interdisciplinary Study of Coordination. **ACM Computing Surveys (CSUR)**, v. 26, n. 1, p. 87–119, 1994. ISSN 15577341. DOI: 10.1145/174666.174668.

MENTZER, John T *et al.* JOURNAL OF BUSINESS LOGISTICS, Vol.22, No. 2, 2001 1. **Journal of Business**, v. 22, n. 2, p. 1–25, 2001.

MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick *et al.* **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. [S.l.: s.n.], 2018. P. 320. ISBN 9788535291353. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=J01oDwAAQBAJ>.

RAGSDALE, Cliff. Spreadsheet Modeling and Decision Analysis: A Practical Introduction to Business Analytics, p. 845, 2017. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Spreadsheet-Modeling-Decision-Analysis-Introduction/dp/130594741X>.

SILVER, Edward A; PYKE, David F; PETERSON, R. **Inventory management and production planning scheduling**. [S.l.: s.n.], 2016. P. 767. ISBN 9781466558618.

SIMCHI-LEVI, David; KAMINSKY, Phillip; SIMCHI-LEVI, Edith. **Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies and Cases**. [S.l.: s.n.], 1999. P. 528. ISBN 0-256-26168-7. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Designing-Managing-Supply-Chain-Strategies/dp/0072357568>.

SPENGLER, Joseph J. Vertical integration, tying, and antitrust policy. **American Economic Review**, v. 68, n. 3, p. 397–402, 1950. ISSN 00028282. DOI: 10.2307/1805271.

STANK, Theodore; CRUM, Michael; ARANGO, Miren. Benefits of Interfirm Coordination in Food Industry Supply Chains. **Journal of Business Logistics**, 1999. ISSN 0197-6729.

TSAY, Andy A. Designing and controlling the outsourced supply chain. **Foundations and Trends in Technology, Information and Operations Management**, v. 7, n. 1-2, p. 1–160, 2013. ISSN 15719545. DOI: 10.1561/02000000030.

TSAY, Andy A.; NAHMIAS, Steven; AGRAWAL, Narendra. Modeling Supply Chain Contracts: A Review, p. 299–336, 1999. DOI: 10.1007/978-1-4615-4949-9_10.

VEINOTT, Arthur F. The Status of Mathematical Inventory Theory. **Management Science**, v. 12, n. 11, p. 745–777, 1966. ISSN 0025-1909. DOI: 10.1287/mnsc.12.11.745.

WAGNER, Harvey M.; WHITIN, Thomson M. Dynamic version of the economic lot size model. **Management Science**, v. 50, 12 SUPPL., p. 1770–1777, 1954. ISSN 00251909. DOI: 10.1287/mnsc.1040.0262.

WHANG, Seungjin. Coordination in operations: A taxonomy. **Journal of Operations Management**, v. 12, n. 3-4, p. 413–422, 1995. ISSN 02726963. DOI: 10.1016/0272-6963(95)00010-P.

WILD, Tony. The basis of inventory control. **Best Practice in Inventory Management**, p. 1–15, 2002. DOI: 10.4324/9781315231532-2.

WILLIAM, L. Berry; WHYBARK, D. Clay; VOLLMANN, Thomas E. **Manufacturing Planning and Control for Supply Chain Management**. [S.l.: s.n.], 2007. P. 312–317. ISBN 978-0-07-337782-7. Disponível em:
<https://www.amazon.com.br/Manufacturing-Planning-Control-Supply-Management/dp/0072299908>.