

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
INDUSTRIAL

LAION XAVIER PEREIRA

**MODELAGEM DE UMA CADEIA DE SUPRIMENTOS COM LOGÍSTICA REVERSA E
INCERTEZA NA DEMANDA UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA
MISTA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CURITIBA
2016**

LAION XAVIER PEREIRA

**MODELAGEM DE UMA CADEIA DE SUPRIMENTOS COM LOGÍSTICA REVERSA E
INCERTEZA NA DEMANDA UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA
MISTA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de "Mestre em Ciências - Área de Concentração: Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Lüders

Coorientador: Prof. Dr. Leandro Magatão

CURITIBA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

P436m Pereira, Laion Xavier
2016 Modelagem de uma cadeia de suprimentos com logística reversa e incerteza na demanda utilizando programação linear inteira mista / Laion Xavier Pereira.-- 2016. 176 p.: il.; 30 cm.

Disponível também via World Wide Web.

Texto em português, com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de Concentração: Engenharia de Computação, Curitiba, 2016.

Bibliografia: p. 164-171.

1. Logística empresarial - Modelos matemáticos. 2. Distribuição de mercadorias. 3. Programação linear. 4. Programação inteira. 5. Incerteza (Economia). 6. Demanda (Teoria econômica). 7. Tributos. 8. Controle de estoque. 9. Engenharia elétrica - Dissertações. I. Lüders, Ricardo, orient. II. Magatão, Leandro, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD: Ed. 22 -- 621.3

Biblioteca Central do Câmpus Curitiba - UTFPR

Título da Dissertação Nº. _____

Modelagem de uma Cadeia de Suprimentos com Logística Reversa e Incerteza na Demanda Utilizando Programação Linear Inteira Mista

por

Laion Xavier Pereira

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Lüders (UTFPR)

Coorientador: Prof. Dr. Leandro Magatão (UTFPR)

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: **ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO** do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às **09h** do dia 16 de dezembro 2016. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores doutores:

Prof. Dr. Ricardo Lüders
(Presidente – UTFPR)

Prof. Dr. Luiz Carlos Felizari
(IFPR)

Prof. Dr. Luiz Carlos de Abreu Rodrigues
(UTFPR)

Visto da coordenação:

Prof. Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao orientador Prof. Dr. Ricardo Lüders pela constante orientação e aprendizado durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Leandro Magatão pela parceria e contribuição durante a construção deste projeto.

Aos professores Marjorie Benegra e Eduardo Pacheco pela inspiração de seguir com os estudos acadêmicos desde a graduação.

Aos amigos Rodrigo Acras, Mariene Teixeira, Everaldo Beltrão, Emerson Cunha e Juarez de Souza pelo apoio e compreensão.

Aos membros da banca pela disposição de examinarem este trabalho e sugestões realizadas.

Aos meus pais, irmãos e toda minha família pelo carinho, apoio, paciência e compreensão.

Agradecimento especial a Sweder Souza pelo constante auxílio e compreensão dedicados durante os momentos de dificuldade e alegria.

RESUMO

PEREIRA, Laion Xavier MODELAGEM DE UMA CADEIA DE SUPRIMENTOS COM LOGÍSTICA REVERSA E INCERTEZA NA DEMANDA UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Este trabalho considera uma cadeia de suprimentos (CS) que opera com logística reversa. A modelagem da CS foi adaptada de um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) da literatura que maximiza o valor presente líquido (VPL) esperado para o caso de uma empresa brasileira. Esta adaptação considera uma CS de menor complexidade, com um número menor de nós e produtos em relação à aplicação da literatura. A estrutura da CS considerada é formada por duas fábricas, dois centros de distribuição, dois pontos varejistas e quatro mercados consumidores, assim como fluxos de transporte direto e reverso de produtos. A modelagem da CS considera ainda incertezas na demanda e cenários com e sem tributação. Os resultados mostram os fluxos de transporte de produtos no sentido direto e reverso, estoques ao longo da CS, assim como aspectos econômicos segundo regras tributárias e incentivos fiscais. Estes aspectos econômicos são utilizados para justificar o investimento na logística reversa. Embora a incerteza na demanda altere o VPL esperado, que é maior quando cenários otimistas de demanda são considerados, resultados obtidos para diversos cenários de demanda mostram que esta alteração não é significativa.

Palavras-chave: Cadeia de suprimentos, Programação linear inteira mista, Logística reversa, Otimização, Tributação.

ABSTRACT

PEREIRA, Laion Xavier MODELING A SUPPLY CHAIN WITH REVERSE LOGISTICS AND DEMAND UNCERTAINTY USING MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

This dissertation considers a supply chain (SC) with reverse logistics. The SC modeling has been modified for a Brazilian company from a MILP model which maximizes the expected net present value (NPV) found in the literature. This modification considers a low complexity SC with fewer number of nodes and products than the application of the literature. The SC structure is composed by two factories, two warehouses, two retailers, and four markets as well as direct and reverse flows of products. The SC modeling also considers demand uncertainty and scenarios with and without taxes. The results show direct and reverse flows of products, inventories, and economic aspects according to tax rules and incentives. These economic aspects are used to justify the investment in reverse logistics. Although the demand uncertainty changes the expected NPV, which is big for scenarios with optimistic demand, the results obtained for several scenarios of demand show that the expected NPV is not quite affected.

Keywords: Supply chain, Mixed integer linear programming, Reverse logistics, Optimization, Tax.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura de Logística Reversa.....	41
Figura 2: Representação da CS.....	51
Figura 3: Árvore de cenários.....	52
Figura 4: Conjunto de entidades.....	64
Figura 5: Caso A.....	86
Figura 6: Caso B.....	87
Figura 7: Caso B3.....	88
Figura 8: Resultados dos Custos dos Casos A, B e Real para $t=1$	89
Figura 9: Resultados Operacionais dos Casos A, B e Real para $t=1$	90
Figura 10: Mapa dos Estados Brasileiros.....	91
Figura 11: Fluxos de Transporte do Caso A em $t=1$	97
Figura 12: Fluxos de Transporte do Caso A em $t=2$	98
Figura 13: Fluxos de Transporte do Caso A em $t=3$	98
Figura 14: Fluxos de Transporte do Caso B em $t=1$ (instante inicial).....	100
Figura 15: Fluxos de Transporte do Caso B em $t=1$ (instante intermediário).....	101
Figura 16: Fluxos de Transporte do Caso B em $t=1$ (instante final).....	102
Figura 17: Fluxos de Transporte do Caso B em $t=2$ (instante inicial).....	103
Figura 18: Fluxos de Transporte do Caso B em $t=2$ (instante intermediário).....	105
Figura 19: Fluxos de Transporte do Caso B em $t=2$ (instante final).....	106
Figura 20: Fluxos de Transporte do Caso B em $t=3$ (instante inicial).....	107
Figura 21: Fluxos de Transporte do Caso B em $t=3$ (instante intermediário).....	108
Figura 22: Fluxos de Transporte do Caso B em $t=3$ (instante final).....	109
Figura 23: Custos do Caso A, sem impostos e Caso A1, com impostos para $t=1$	117
Figura 24: Resultados Operacionais do Caso A, sem impostos e Caso A1 com impostos para $t=1$	117
Figura 25: Custos dos casos B e B1, sem e com impostos para $t=1$	119
Figura 26: Resultados Operacionais dos casos B e B1, sem e com impostos para $t=1$	119
Figura 27: Probabilidade (pb) dos cenários para o caso B2.....	126
Figura 28: Variação de demanda (vds) para cada cenário S para o caso B2.....	126
Figura 29: Fluxos de Transporte do Caso B2 em $t=1$ (instante inicial).....	129
Figura 30: Fluxos de Transporte do Caso B2 em $t=1$ (instante intermediário).....	130
Figura 31: Fluxos de Transporte do Caso B2 em $t=1$ (instante final).....	131
Figura 32: Resultados Operacionais do caso B para $t=1$ e caso B2 para $t = 1, 2$ e 3	134
Figura 33: Resultados dos custos do caso B para $t=1$ e caso B2 para $t = 1, 2$ e 3	135
Figura 34: Valor Presente Líquido para cada rodada.....	138
Figura 35: Fluxos de Transporte do Caso B3 em $t=1$ (instante inicial).....	140
Figura 36: Fluxos de Transporte do Caso B3 em $t=1$ (instante intermediário).....	142
Figura 37: Fluxos de Transporte do Caso B3 em $t=1$ (instante final).....	144
Figura 38: Fluxos de Transporte do Caso B3 em $t=2$ (instante inicial).....	147
Figura 39: Fluxos de Transporte do Caso B3 em $t=2$ (instante intermediário).....	148
Figura 40: Fluxos de Transporte do Caso B3 em $t=2$ (instante final).....	149
Figura 41: Fluxos de Transporte do Caso B3 em $t=3$ (instante inicial).....	150
Figura 42: Fluxos de Transporte do Caso B3 em $t=3$ (instante intermediário).....	151
Figura 43: Fluxos de Transporte do Caso B3 em $t=3$ (instante final).....	152

Figura 44: Resultados dos Custos dos Casos B e B3 para $t=1$	153
Figura 45: Resultados Operacionais dos Casos B e B3 para $t=1$	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores de decisão em projeto de CS.	33
Tabela 2: Limite inferior dos fluxos de transporte.....	55
Tabela 3: Parâmetros do modelo.	62
Tabela 4: Conjuntos e Subconjuntos do modelo.	63
Tabela 5: Índices do modelo.	64
Tabela 6: Conjuntos esparsos.....	65
Tabela 7: Variáveis contínuas do modelo.	66
Tabela 8: Variáveis binárias do modelo.	67
Tabela 9: Variáveis das regras tributárias	82
Tabela 10: Resultados Computacionais.....	95
Tabela 11: Fluxos de Transporte Caso A para $t=1$, $t=2$ e $t=3$	97
Tabela 12: Fluxos de Transporte Caso B para $t=1$ (instante inicial).....	99
Tabela 13: Fluxos de Transporte Caso B para $t=1$ (instante intermediário).	101
Tabela 14: Fluxos de Transporte Caso B para $t=1$ (instante final).	102
Tabela 15: Fluxos de Transporte Caso B para $t=2$ (instante inicial).....	103
Tabela 16: Fluxos de Transporte Caso B para $t=2$ (instante intermediário).	104
Tabela 17: Fluxos de Transporte Caso B para $t=2$ (instante final).	105
Tabela 18: Fluxos de Transporte Caso B para $t=3$ (instante inicial).....	107
Tabela 19: Fluxos de Transporte Caso B para $t=3$ (instante intermediário).	108
Tabela 20: Fluxos de Transporte Caso B para $t=3$ (instante final).	109
Tabela 21: Nível de estoque médio nos centros de armazenamento Caso A para $t=1,2$ e 3.	111
Tabela 22: Nível de estoque médio nos centros de armazenamento Caso B para $t=1,2$ e 3.	111
Tabela 23: Custos de Produção sem e com impostos para $t=1,2$ e 3.	112
Tabela 24: Novos custos de produção com Impostos (Oc) em f_1 para $t = 1,2$ e 3.....	114
Tabela 25: Novos custos de produção com Impostos (Oc) em f_2 para $t = 1, 2$ e 3... ..	116
Tabela 26: Custo de Oportunidade em f_2 para $t = 1, 2$ e 3.	122
Tabela 27: Probabilidades (pb) de cenários e variação de demanda (vd) para cada período de tempo t	127
Tabela 28: Fluxos de Transporte Caso B2 para $t=1$ (instante inicial).....	129
Tabela 29: Fluxos de Transporte Caso B2 para $t=1$ (instante intermediário).	130
Tabela 30: Fluxos de Transporte Caso B2 para $t=1$ (instante final).	131
Tabela 31: Fluxos de Transporte Caso B2 para $t=2$, cenário Realista.	132
Tabela 32: Fluxos de Transporte Caso B2 para $t=3$, cenário Realista Realista.	133
Tabela 33: Probabilidade (pb) de cada cenário em cada rodada.	136
Tabela 34: Variação de demanda de cada cenário em cada rodada.	137
Tabela 35: Fluxos de Transporte Caso B3 para $t=1$ (instante inicial).....	140
Tabela 36: Custo de produção para $t=1$	141
Tabela 37: Fluxos de Transporte Caso B3 para $t=1$ (instante intermediário).	142
Tabela 38: Custo de retrabalho para $t=1$	143
Tabela 39: Fluxos de Transporte Caso B para $t=1$ (instante final).	144
Tabela 40: Fluxos de Transporte Caso B3 para $t=2$ (instante inicial).	146
Tabela 41: Fluxos de Transporte Caso B3 para $t=2$ (instante intermediário).	147
Tabela 42: Fluxos de Transporte Caso B para $t=2$ (instante final).	148

Tabela 43: Fluxos de Transporte Caso B3 para $t=3$ (instante inicial).....	150
Tabela 44: Fluxos de Transporte Caso B3 para $t=3$ (instante intermediário).	151
Tabela 45: Fluxos de Transporte Caso B3 para $t=3$ (instante final).	152
Tabela 46: Valores dos parâmetros.	172
Tabela 47: Demanda dos clientes por P5 e Preço final da Venda por período.	175
Tabela 48: Alíquotas de ICMS.....	176

LISTA DE SIGLAS

ABIHPEC	Associação Brasileira da Indústria de Higiene Pessoal e Cosméticos
ACP	Avaliação do Ciclo de Vida do Produto
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BOM	<i>Bill of Material</i>
CCAD	Configuração da Cadeia
CDI	Certificado de Depósito Interbancário
CF	Fluxo de Caixa
CLSC	<i>Closed Loop Supply Chain</i>
COFINS	Contribuição para Financiamento da Seguridade Social
CS	Cadeia de Suprimentos
FCI	Custo Fixo de Investimento
FDC	Fração de Depreciação do Capital
GEE	Gases do Efeito Estufa
GEST	Gestão dos Estoques
GNV	Gás Natural Veicular
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i>
NF	Nota Fiscal
NPV	<i>Net Present Value</i>
PIS	Programas de Integração Social
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PNLIM	Programação Não Linear Inteira Mista
Q	Quantidade de produtos bons
QEL	Quantidade de produtos <i>End-Life</i>
QNC	Quantidade de produtos Não Conformes

S&OP	<i>Sales and Operations Planning</i>
SCM	<i>Supply Chain Management</i>
SCND	<i>Supply Chain Network Design</i>
UN	Unidade de Negócio
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VAT	<i>Value-added Tax</i>
VPL	Valor Presente Líquido
VPLE	Valor Presente Líquido Esperado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	MOTIVAÇÃO	19
1.2	OBJETIVOS	20
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1	CADEIA DE SUPRIMENTOS	24
2.2	MODELOS DE OTIMIZAÇÃO DE CADEIAS DE SUPRIMENTOS	27
2.3	LOGÍSTICA REVERSA	35
2.4	CARGA TRIBUTÁRIA EM CADEIA DE SUPRIMENTOS	43
2.5	FATORES ADICIONAIS	47
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	49
3	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	50
3.1	ESTRUTURA DA CADEIA DE SUPRIMENTOS	50
3.2	INCERTEZA NA DEMANDA	51
3.3	DADOS E RESTRIÇÕES OPERACIONAIS DA CADEIA DE SUPRIMENTOS	52
3.3.1	Restrições de Capacidade	54
3.3.2	Restrições dos Fluxos de Transporte	54
3.3.3	Restrições dos Custos	55
3.4	REGRAS TRIBUTÁRIAS	56
3.4.1	Tributação no estado da Bahia	57
3.4.2	Tributação no estado do Paraná	58
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	58
4	MODELO MATEMÁTICO	60
4.1	PREMISSAS	60
4.2	NOMENCLATURA	62
4.2.1	Parâmetros	62
4.2.2	Conjuntos	63
4.2.3	Índices	64
4.2.4	Variáveis Contínuas	66
4.2.5	Variáveis Binárias	67
4.3	FUNÇÃO OBJETIVO	67

4.4 RESTRIÇÕES	71
4.4.1 Restrições de Balanço de Massa e Limite de Compras.....	71
4.4.2 Restrições de Vendas e Demanda	74
4.4.3 Restrições dos Processos de Tecnologia i	75
4.4.4 Restrições de Armazenamento	77
4.4.5 Restrições de Fluxo Reverso.....	79
4.4.6 Restrições de Variáveis Binárias	80
4.4.7 Restrição de Capital de Investimento.....	81
4.5 REGRAS TRIBUTÁRIAS.....	82
4.5.1 Regras tributárias da fábrica da Bahia.....	82
4.5.2 Regras tributárias da fábrica do Paraná	83
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	84
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	86
5.1 CONFIGURAÇÕES.....	86
5.2 VERIFICAÇÃO DO MODELO.....	88
5.3 FLUXOS DE TRANSPORTE E NÍVEIS DE ESTOQUE DOS CASOS A E B.....	96
5.3.1 Fluxos de Transporte Caso A.....	96
5.3.2 Fluxos de Transporte Caso B.....	99
5.3.3 Nível de Estoque Médio	110
5.4 CÁLCULOS DA LÓGICA TRIBUTÁRIA.....	112
5.5 RESULTADOS DOS CASOS A e A1 (SEM E COM IMPOSTOS)	116
5.6 RESULTADOS DOS CASOS B E B1 (SEM E COM IMPOSTOS).....	118
5.7 CÁLCULO DO CUSTO DE OPORTUNIDADE	121
5.8 ANÁLISE DA DESONERAÇÃO FISCAL E LOGÍSTICA REVERSA	123
5.9 RESULTADOS DO CASO B2 (INCERTEZAS NA DEMANDA).....	125
5.9.1 Probabilidades (pb) de cenários e variação de demanda (vd).....	125
5.9.2 Fluxos de Transporte caso B2.....	128
5.9.3 Resultados Operacionais para os casos B e B2	134
5.10 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO CASO B2.....	136
5.10.1 Probabilidade (pb) dos cenários de demanda.....	136
5.10.2 Variação de demanda (vd).....	137
5.10.3 Análise dos resultados com incertezas	137
5.11 RESULTADOS DO MODELO DO CASO B3.....	138

5.12 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	155
6 CONCLUSÃO	160
6.1 TRABALHOS FUTUROS.....	163
REFERÊNCIAS.....	164
APENDICE A – TABELAS DE DADOS DO MODELO	172
ANEXO	176

1 INTRODUÇÃO

O cenário econômico atual favorece o crescimento da competitividade entre as indústrias que atuam no mesmo nicho de mercado. Eficiência na gestão dos estoques, dos recursos e das atividades logísticas da cadeia de suprimentos tornam-se um fator decisivo nos resultados operacionais das corporações. Além disso, a legislação e o comportamento do mercado consumidor têm contribuído para o crescimento da demanda por produtos, cujas atividades de produção, distribuição, armazenamento e logística reversa devem estar alinhadas com as normas de sustentabilidade e ecoeficiência.

Conforme Fleischman *et al.* (2001), cadeias de suprimentos que operam com Logística Reversa incluem no seu escopo atividades de retorno no sentido reverso do fluxo de distribuição para a recuperação de produtos não conformes através de processos de reparo, recondicionamento, remanufaturamento e reciclagem. Deve ser considerado também como atividade de logística reversa os casos de descarte de produtos não recuperáveis.

Particularmente, a empresa considerada neste trabalho realizou uma pesquisa em 2015 que revelou que 30% do público de interesse da empresa associa a marca a alguma iniciativa de reciclagem, coleta ou reutilização de embalagem. Em 2015, foram credenciadas nove novas cooperativas, totalizando 21 parcerias e mais de 900 cooperados beneficiados diretamente. O Programa Reciclagem de Embalagens está presente em 1.750 municípios e 4 mil pontos de vendas com mais de 3 mil motoristas das transportadoras engajados no programa.

A estratégia de integração das atividades de Logística Reversa com as atividades logísticas do fluxo direto da cadeia tem o objetivo de contribuir na agilidade para a tomada de decisão de assuntos que envolvam estoques de produtos que encontram-se armazenados nos depósitos por não conformidade, final de vida útil, baixo desempenho nas vendas, divergências do plano de demanda previsto *versus* o realizado, entre outros motivos. Indicadores como Análise da Qualidade dos Estoques,

Políticas de Estoques de Segurança, Estoques Bloqueados por não conformidade, entre outros, estão presentes no Plano de Metas e em acordos profissionais dos colaboradores e são determinantes para o cálculo do lucro líquido das empresas.

Inicialmente, os sistemas de estocagem tinham como objetivo armazenar produtos em épocas de escassez. Com o advento da revolução industrial e o crescimento populacional surgem outras necessidades tais como: disponibilidade de produtos nos centros consumidores, aumento da capacidade de estocagem, abastecimento das fábricas e a redução de perdas de produtos, por exemplo. Deste modo, os primeiros passos estavam sendo dados para uma gestão eficiente dos estoques. Entretanto, na atualidade, o pensamento estocar para consumir torna-se obsoleto e surgem novos conceitos sobre a gestão de estoques. Assim, o problema atual dos estoques é estendido e analisado sob o enfoque de custos, nível de serviço e fluxo de materiais ao longo de toda a cadeia de suprimentos (BALLOU, 1992).

A eficiência na gestão da cadeia de suprimentos tem apresentado papel fundamental para o sucesso da indústria, não somente no que diz respeito ao gerenciamento dos estoques para o aumento de giro dos produtos ou atendimento da demanda dos mercados consumidores, mas também na coordenação das atividades de logística reversa que atendam os critérios de sustentabilidade no reaproveitamento de recursos limitados de forma a contribuir na redução de desperdícios.

Conforme Papageorgiou (2009), em resposta à pressão sobre a indústria para implementação de métodos de produção e gestão da cadeia que sejam sustentáveis e que se preocupem com o impacto social e ambiental, as companhias estão incorporando sistematicamente aspectos ambientais no gerenciamento da cadeia de suprimentos, incluindo fornecedores, fábricas, distribuidores, varejo e mercados consumidores. Neste contexto, as indústrias têm intensificado o controle do desempenho ecológico dos processos produtivos e de distribuição da carteira de fornecedores que abastecem sua cadeia, a fim de identificar oportunidades de redução de custos e maximização da ecoeficiência nos seus processos.

Uma prática comum utilizada na indústria como critério para seleção dos fornecedores é a exigência que participem de fóruns de sustentabilidade e que apresentem projetos de processos produtivos com características sustentáveis que mitiguem impactos sociais e ambientais ao planeta.

No Brasil, as empresas estão inseridas numa dinâmica tributária que pode ser explorada para captar os benefícios fiscais oferecidos pelos programas de incentivo do Governo Federal a fim de aumentar os resultados financeiros. Porém, a legislação tributária brasileira vai de encontro aos princípios de sustentabilidade, uma vez que o governo fomenta, através de incentivos fiscais, práticas de distribuição logística nada ecoeficientes. Por exemplo, o Programa do Governo chamado de “Desenvolve” concede incentivos fiscais para empresas instaladas nos estados da região Nordeste. Este benefício estimula que fábricas, antes localizadas na região sul e sudeste do país, migrem para a região Nordeste. Desta forma, são criadas novas rotas de transporte de fornecedores de insumos localizados na região sul que devem realizar entregas no Nordeste. E, conseqüentemente, distribuição dos produtos acabados para região sul. A legislação tributária brasileira promove desenvolvimento social de regiões menos favorecidas e estimula maior emissão de gás carbônico de rotas de transporte de longa distância que antes não existiam.

Neste contexto, o desenvolvimento de um modelo que considere as regras tributárias brasileiras para apoiar a tomada de decisões desperta interesse da área de planejamento estratégico. Embora sendo uma questão antiga, incluir a lógica tributária no projeto da cadeia de suprimentos ainda não dispõe de um modelo consolidado.

Outra questão importante na modelagem de cadeia de suprimentos são as incertezas de demanda do mercado consumidor que a cadeia está submetida. Uma técnica utilizada na modelagem das oscilações de demanda é a representação da demanda que possui características estocásticas em informações determinísticas nos intervalos dentro dos quais a demanda pode variar.

Cadeias de suprimentos do ramo cosmético operam para o abastecimento de mercados consumidores localizados em diferentes regiões do país e centros distribuidores que atendem as revendedoras de venda direta, sendo extremamente difícil prever a exata demanda de cada produto. Dessa forma, é importante considerar incerteza na operação da cadeia para análise dos resultados em diferentes cenários de demanda.

1.1 MOTIVAÇÃO

Neste contexto, o projeto de cadeias de suprimentos que operam em fluxo direto e reverso apresenta grandes desafios. A obtenção de um modelo de otimização de uma cadeia que integre atividades do fluxo direto de produção, armazenagem e distribuição com as atividades de logística reversa como desmontagem, remanufaturamento, recondicionamento e o fluxo reverso de armazenagem e distribuição é um desafio comentado por autores da área. Por exemplo, Melo *et al.* (2008) comentaram que um aspecto que precisa receber mais atenção é a integração completa das atividades do sentido direto e logística reversa no Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos. O estudo reforçou ainda que, poucos artigos exploram esta integração do fluxo direto e reverso de produtos na cadeia.

É possível encontrar modelos que utilizam técnicas de otimização em cadeia de suprimentos em alguns trabalhos de autores que abordam as questões de atividades de logística reversa, sustentabilidade e fechamento do *loop* na rede no projeto e na modelagem da cadeia, tais como em Salema, Póvoa, e Novais (2006; 2007; 2009), Cardoso *et al.* (2013) e Xiong *et al.* (2016).

Desta forma, os últimos trabalhos realizados pelos autores Papageorgiou (2009), Cardoso *et al.* (2013) e Dondo e Méndez (2016) sobre o estudo de um modelo de cadeias de suprimentos que envolva as questões de sustentabilidade, cadeia *green*, logística reversa, cadeia com *loop* fechado, ecoeficiência e outras abordagens relacionadas ao meio ambiente se consolidou como uma causa importante. Ressalta-se que existem ainda desafios na criação de um modelo de cadeia de suprimentos que opera no seu fluxo direto, no fluxo reverso e sob incertezas na demanda dos mercados consumidores com o monitoramento dos estoques da cadeia de produtos bons, em final de vida útil, reprovados por não conformidade, em retrabalho, em terceiros, em montagem, em desmontagem e em processo de descarte.

A motivação do trabalho está no desafio da construção de um modelo de otimização de uma cadeia de suprimentos que considere, além das operações logísticas do sentido direto e reverso e cenários de incertezas na demanda, também inclua as regras da legislação tributária brasileira, a fim de otimizar os ganhos com benefícios fiscais concedidos pelo governo.

Alguns trabalhos realizam a construção de um modelo de otimização da cadeia de suprimentos sem considerar fluxo reverso no seu projeto e planejamento, preocupados, primeiramente, com a maneira de abordar a demanda que possui características estocásticas na parametrização do modelo, transformando-a em determinística, fato verificado em Vidal e Goetschalckx (1997) e Papageorgiou (2009).

Vidal e Goetschalckx (1997) afirmam que o desafio é a capacidade de representação dos fatores qualitativos e incertezas no modelo e o replanejamento contínuo diante das alterações da economia e do mercado.

Na literatura atual ainda faltam trabalhos que evidenciem nos seus estudos o impacto das questões fiscais nas operações logísticas e no resultado financeiro de uma cadeia de suprimentos. Também faltam pesquisas que disponibilizem modelos de otimização capazes de mensurar se os custos de investimentos, necessários para viabilizar oportunidades de captação de ganhos tributários, serão retornáveis em curto, médio ou longo período de tempo.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é adaptar o modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista desenvolvido por Cardoso *et al.* (2013) para um estudo de caso de uma cadeia de suprimentos que opera com logística reversa. São considerados fatores como produção, armazenagem, distribuição de produtos e atividades de logística reversa, como recuperação e descarte.

Além disso, a cadeia de suprimentos opera sob incertezas na demanda e sob uma legislação que propõe alterações nas operações logísticas justificadas pelos incentivos fiscais oferecidos por programas do governo federal. Assim, uma contribuição é a de incluir no modelo de otimização, adaptado de Cardoso *et al.* (2013), regras tributárias brasileiras, a fim de verificar o impacto nos resultados operacionais da cadeia.

A partir do modelo desenvolvido por Cardoso *et al.* (2013), constituem-se objetivos específicos do trabalho:

- Adaptar o modelo de Cardoso *et al.* (2013; 2015) em Programação Linear Inteira Mista para o caso de uma indústria real brasileira, com a utilização do

software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio, que integre as atividades do fluxo direto da cadeia de suprimentos como recebimento dos insumos dos fornecedores, produção, armazenagem e distribuição com as atividades do fluxo reverso, como retorno dos produtos não conformes para remanufaturamento, recondicionamento, montagem, desmontagem, descarte e nova disponibilização do produto recuperado para os mercados consumidores, a fim de minimizar os custos logísticos;

- A partir dos estudos do modelo proposto de Cardoso *et al.* (2013; 2015), realizar um estudo de caso de um cadeia de suprimentos brasileira que opera sob incertezas na demanda e possui características de uma cadeia *green* que está submetida à legislação tributária que incentiva operações logísticas que vão de encontro com as questões de sustentabilidade e ecoeficiência;
- A partir dos resultados obtidos com o modelo matemático, avaliar os resultados operacionais da cadeia de suprimentos referentes ao valor presente líquido e vendas, bem como os resultados dos custos com produção, distribuição e compra de matéria-prima para as versões do modelo que possuem configurações de fluxos reversos diferentes. Iniciando-se do caso mais simples, onde apenas existe fluxo logístico no sentido direto entre os processos sequenciais, até a análise do caso mais complexo em que existe fluxo logístico no sentido direto e reverso, com exceção dos fornecedores, pois o modelo irá considerar somente as devoluções de produto acabado e não de insumos e matéria-prima.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O Capítulo 2 é uma revisão bibliográfica sobre Cadeia de Suprimentos (CS), Gerenciamento e Planejamento em CS, Logística Reversa e Fechamento de Ciclo em CS. A seguir discute-se os fatores principais que impactam Projeto de CS, como fatores econômicos, de produção, armazenagem e distribuição, incertezas na demanda, CS que operam com Ciclo Fechado, Modelos de Otimização com Funções Objetivo de Minimização e Maximização, bem como Modelos PLIM de Logística

Reversa e Logística Verde. O capítulo finaliza com a discussão do impacto das questões que envolvem a Carga Tributária nas operações em Cadeias de Suprimentos.

O Capítulo 3 apresenta uma descrição das características e particularidades do problema abordado. Iniciando-se pela apresentação das características do modelo de otimização proposto com a estrutura da cadeia de suprimentos, a árvore de cenários, a configuração dos casos que serão analisados e as principais restrições que norteiam a tomada de decisão da operação desta rede, assim como a lógica tributária que a cadeia está inserida.

O Capítulo 4 apresenta a formulação do modelo da cadeia de suprimentos adaptado do trabalho de Cardoso *et al.* (2013) utilizando técnicas de Programação Linear Inteira Mista (PLIM). Algumas premissas e simplificações foram adotadas para a representação do estudo de caso de uma empresa brasileira. Neste capítulo descrevem-se as premissas adotadas, nomenclatura utilizada e as restrições que definem o modelo. Após adaptado o modelo de Cardoso *et al.* (2013) da cadeia de suprimentos com logística reversa, onde o objetivo é maximizar o Valor Presente Líquido, derivou-se quatro estudos de caso: (i) Caso A, sem logística reversa, sem impostos; (ii) Caso A1, sem logística reversa, com impostos; (iii) Caso B, com logística reversa, sem impostos; e, (iv) Caso B1, com logística reversa, com impostos; (v) Caso B2, com incertezas na demanda; e (vi) Caso B3 com flexibilidade nos fluxos de transporte. Para todos os casos foi considerado o objetivo de maximizar o VPL.

O Capítulo 5 apresenta os resultados alcançados para as diferentes versões obtidas do mesmo modelo propostos no Capítulo 4. Analisa-se os cenários com incertezas para verificar a influência da variação de demanda (vd) e probabilidades de cenários (pb) nos resultados operacionais para cada rodada do modelo. Para encerrar o capítulo discute-se as decisões propostas pelo modelo que opera com flexibilidade nos fluxos de transporte entre as entidades da cadeia de suprimentos.

O Capítulo 6 conclui a dissertação, apresentando as contribuições mais relevantes no estudo do projeto de cadeia de suprimentos que opera com logística reversa, incertezas na demanda e regras tributárias, bem como os principais trabalhos a serem desenvolvidos futuramente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CADEIA DE SUPRIMENTOS

Cadeias de suprimentos podem ser tradicionalmente definidas como um sistema logístico que começa pelos fornecedores de matéria-prima e termina com as vendas e distribuição dos produtos para o cliente final (BEAMON, 1998).

Ballou (1992) menciona que cadeia de suprimentos pode ser definida como o caminho percorrido por um produto desde os fornecedores de matéria-prima, passando pela distribuição, manufatura, montagem do produto e, finalmente, distribuição do produto final aos centros consumidores.

Em cadeia de suprimentos existem diferentes tipos de instalações, cada uma possui uma função específica (produção, distribuição), e um fluxo de materiais entre elas. Cada conjunto de instalações que são do mesmo tipo e com a mesma função é usualmente denotado como uma camada, elo ou nível, definindo-se uma hierarquia das instalações (SAHIN e SURAL, 2007).

O conjunto de fornecedores que abastecem a cadeia de suprimentos são considerados como uma camada, fábricas caracterizam outra camada, centros de distribuição também, assim como os mercados consumidores. O termo *single-layer* refere-se às instalações que compõe um único grupo da mesma camada e instalações *multiple-layer* caracterizam múltiplos grupos de instalações com diferentes funções na cadeia.

Gerenciamento em Cadeia de Suprimentos é definido como o conjunto de elementos eficientemente integrados como fornecedores, fábricas, centros de distribuição e mercado consumidor. A mercadoria é produzida e distribuída na quantidade exata, no local correto e no tempo certo, a fim de minimizar os custos e atender a demanda dos clientes (SIMCHI-LEVI *et. al.* 1999).

Hugos (2003) diz que gerenciamento em cadeia de suprimentos é a coordenação da produção, estoques, armazenagem e transporte entre os elementos da

cadeia para o atendimento do mercado consumidor. O gerenciamento da cadeia de suprimentos envolve todas as movimentações e armazenamento de matéria-prima e processos de trabalho de estoque (CORDEAU *et al.* 2006).

De acordo com Cardoso *et al.* (2013), o gerenciamento eficiente de cadeias de suprimentos é um grande desafio dos últimos anos que tem recebido atenção da comunidade acadêmica e industrial. Isto é interpretado pelo crescimento consistente do número de artigos publicados sobre a integração de atividades de produção e distribuição em cadeias de suprimentos, tema abordado em, por exemplo, Erenguc *et al.*, (1998) e Panos *et al.*, (2006).

Conforme Barbosa-Póvoa *et al.* (2007), de fato, se cadeias de suprimentos apresentarem um projeto e operação eficientes, podem contribuir positivamente para o gerenciamento de cadeias de suprimentos e reduzir o impacto ambiental causado pelas entidades. Revisões da literatura sobre cadeias de suprimentos, gerenciamento das atividades logísticas e identificação de oportunidades de melhorias e otimização dos processos industriais podem ser encontradas em Meixell e Gargeya (2005), Melo *et al.* (2008) e Papageorgiou (2009).

Ballou (1992) define que o planejamento em cadeia de suprimentos pode ser distinguido em três níveis: estratégico, operacional e tático. O nível estratégico é responsável pelo planejamento no horizonte de tempo maior que um ano, usando dados aproximados. O nível operacional envolve decisões de curto prazo, ou seja, decisões que devem ser tomadas num prazo de uma hora ou um dia e requerem informações disponíveis rapidamente. Já o nível tático está posicionado entre os dois horizontes anteriores, respeitando o intervalo de responsabilidade de decisão e necessitando de informações mais próximas do real.

Paralelo a estes níveis de planejamento existe a configuração da cadeia que modela as variáveis e restrições da rede. Neste caso, desdobra-se as estratégias da alta gestão no modelo e, conseqüentemente, para os níveis operacionais da empresa. A finalidade é de identificar e executar oportunidades de otimização dos resultados operacionais, caracterizando a integração dos diferentes níveis de planejamento da indústria para definição dos objetivos operacionais e estratégicos.

Melo *et al.* (2008) mencionam que é possível notar um crescimento nas pesquisas que envolvem integração das decisões estratégicas, táticas e operacionais no planejamento de cadeia de suprimentos. Os autores Dondo e Méndez (2016)

complementam que uma prática que já está incorporada ao planejamento estratégico da indústria é a responsabilidade da alta gestão de repensar a todo instante o cenário atual e projetar objetivos de longo e médio prazo que deverão ser desdobrados a todos os profissionais da companhia de maneira rápida e efetiva.

Historicamente, pesquisas têm focado no projeto de sistemas de distribuição, mas sem considerar a cadeia de suprimento como um todo. O desenvolvimento de um modelo de cadeia de suprimentos que seja capaz de considerar no seu projeto todas as atividades logísticas de produção, distribuição e armazenagem dos produtos é um grande desafio que pode ser verificado na literatura atual. Some-se a isso, a possibilidade de verificação dos resultados operacionais para as diferentes estratégias de planejamento, de forma a auxiliar na tomada de decisão, possibilitando um desdobramento rápido e detalhado da operação.

Além de considerar as atividades logísticas do sentido direto da cadeia, a cadeia de suprimentos que atua na recuperação dos seus produtos reprovados precisa considerar também as atividades de logística reversa no desenvolvimento do seu modelo.

Conforme Fleischman *et al.* (2001), cadeias de suprimentos que operam com Logística Reversa incluem no seu escopo atividades de retorno no sentido reverso do fluxo de distribuição como descarte e recuperação de produtos não conformes através de processos de reparo, acondicionamento, remanufaturamento e reciclagem.

Atividades de logística reversa têm atraído atenção dos pesquisadores de gerenciamento de estoques. Começando pelo gerenciamento dos estoques de itens reparáveis em 1960, pesquisas tem aumentado e fortalecido os estudos de medidas de gerenciamento de estoques de produtos e componentes recuperáveis (MITRA, 2005).

Na estrutura de modelos de cadeia de suprimentos que consideram a integração das atividades de logística reversa com as atividades do fluxo normal da cadeia tem sido estudado por alguns autores (FLEISCHMAN *et al.*, 2001):

Cadeias de suprimentos que operam com logística reversa, também chamadas de cadeias com *loop* fechado, incluem no seu escopo, atividades como recuperação de produtos não conformes, a qual é realizada através de processos de reparo, acondicionamento, remanufaturamento e reciclagem. Estas nomenclaturas são utilizadas para cadeias sustentáveis que integram atividades logísticas do fluxo normal e reverso na sua operação.

A postura da sociedade e a legislação têm forçado companhias para considerar aspectos ambientais em diferentes níveis da cadeia de suprimentos. De fato, se o projeto e operação da cadeia de suprimentos for eficiente, pode contribuir positivamente para minimizar os impactos ambientais negativos criados pelas entidades envolvidas. Companhias devem investir em projeto e operação de um sistema para reduzir os danos ambientais (SALEMA *et al.*, 2006).

Papageorgiou (2009) afirma que em resposta à pressão sobre a indústria para implementação de métodos de produção e gestão da cadeia que sejam sustentáveis e que se preocupem com o impacto social e ambiental, as companhias estão incorporando sistematicamente aspectos ambientais no gerenciamento da cadeia de suprimentos incluindo fornecedores, fábricas, distribuidores, *retailers* e consumidores. As pesquisas têm mostrado que o processo de recondicionamento pode ser uma estratégia de promoção efetiva para a indústria reter seus clientes e aumentar seus lucros.

Conforme Dondo e Méndez (2016), o investimento em pesquisa para o desenvolvimento de um modelo computacional que considere todas as variáveis e restrições de uma cadeia de suprimentos tem atraído a atenção da academia e da indústria que precisa minimizar os custos logísticos e operacionais e identificar oportunidades para maximizar os resultados do sistema.

2.2 MODELOS DE OTIMIZAÇÃO DE CADEIAS DE SUPRIMENTOS

O projeto de uma cadeia de suprimentos é definido como o conjunto de entidades que formam a estrutura da rede, as atividades de logística direta e reversa, aspectos econômicos que a cadeia está inserida, questões ambientais, regras tributárias, incertezas na demanda, ciclo de vida do produto e demais aspectos que caracterizam a cadeia.

Os principais aspectos que alteram significativamente o resultado final do projeto de uma cadeia de suprimentos, segundo Vidal e Goetschalckx (1997), Melo *et al.* (2008), Sahin *et al.* (2007), Sabri e Beamon (2008), Papageorgiou (2009), Huang *et al.* (2009), Cardoso *et al.* (2013), são:

- Definição da função objetivo de minimização ou maximização;
- Fatores logísticos de produção, armazenagem e distribuição;

- Incertezas na demanda do mercado consumidor;
- Logística Reversa, Remanufaturamento e Fechamento de Ciclo;
- Sistema Tributário Nacional;
- Fatores internacionais como taxas de câmbio e tarifas;
- Limite disponível no caixa para investimentos;
- Descolamento da demanda prevista e realizada;
- Políticas de estoque incorretas;
- Catástrofes naturais;
- Fornecedores confiáveis;
- E localização das instalações da cadeia.

A partir do projeto da cadeia de suprimentos, modelos de otimização são desenvolvidos para representar a cadeia e apresentar resultados operacionais ótimos. Estes resultados podem sugerir mudanças estruturais no projeto da cadeia, como expansão da capacidade produtiva com abertura de uma nova fábrica, como sugestões para a cadeia atual, como escolha de qual fábrica produzir maior volume de produtos e em qual entidade concentrar atividades de recuperação de produtos.

A seguir, é apresentada uma discussão sobre os principais trabalhos de otimização encontrados na literatura atual que consideram os aspectos citados no desenvolvimento de modelos de otimização para cadeias de suprimentos, iniciando pela definição da função objetivo.

Conforme Melo *et al.* (2008), a função objetivo da maioria dos artigos é minimização dos custos. Modelos com função objetivo de maximização de lucros têm recebido menos atenção nos artigos. Melo *et al.* (2008) classificam as técnicas de maximização dos lucros em duas categorias. A maximização do lucro menos o custo operacional e a maximização do lucro após a incidência de taxas e impostos.

Portanto, trabalhar com modelos de otimização exige também maturidade da área responsável pela modelagem da cadeia de suprimentos. O modelo deve considerar todas as características importantes da organização como as instalações das entidades da cadeia, o fluxo de transporte entre os nós, capacidades produtivas das fábricas e de armazenagem dos depósitos, atividades de logística direta e reversa, fornecedores, posicionamento da demanda dos mercados consumidores em cada

período de tempo, probabilidade de cenários e variações de demanda, além das regras pertinentes ao negócio que possam impactar no resultado operacional.

Também, o modelo precisa considerar as regras tributárias do governo, as atividades de logística direta e reversa, custos de produção em diferentes fábricas, diferenças de custos de mão-de-obra em diferentes regiões do país e custos logísticos de distribuição. Além disso, a área responsável pelo projeto da cadeia de suprimentos deve estar integrada com as áreas estratégicas de planejamento que fornecem informações sigilosas de *budget* disponível para investimento. Ainda, deve haver uma comunicação clara e contínua com as principais áreas do negócio, como *marketing*, demanda, industrial, logística, engenharia, fornecedores, entre outras.

O trabalho de Vidal e Goetschalckx (1997) concentrou o desenvolvimento do seu modelo nos fatores econômicos e logísticos de produção, distribuição e armazenagem da cadeia de suprimentos. Os autores revisaram modelos de otimização de cadeia de suprimentos que operam como sistemas logísticos globais, com o objetivo de identificar oportunidades de ampliação de pesquisa nesta área. O estudo foi direcionado na construção do modelo de otimização do sistema produção-distribuição de produtos na cadeia. Eles definem o gerenciamento do sistema logística-distribuição na cadeia como um novo modelo de orientação para a indústria.

Há também trabalhos como Vidal *et al.* (1997), Sahin *et al.* (2007) e Sabri e Beamon (2000) que consideram incertezas da demanda na modelagem de cadeias de suprimentos. Em geral, estas incertezas na demanda são representadas por variáveis estocásticas ou por variáveis que assumem valores dentro de um intervalo conhecido.

A seguir, é apresentada uma breve discussão de trabalhos sobre o projeto de cadeias de suprimentos que operam sob incerteza na demanda.

No projeto de cadeias de suprimentos é possível considerar informações estocásticas em múltiplos períodos. O período de tempo é um intervalo t , onde são definidas informações como variações de demanda e custos da cadeia. Cada período de tempo pode ser configurado por um intervalo de tempo de dias, semanas, meses ou anos. Um parâmetro é considerado estocástico quando pode ser caracterizado por uma distribuição de probabilidade (SAHIN e SURAL, 2007).

A maior dificuldade na construção de modelos de otimização de cadeias de suprimentos é a modelagem das incertezas da demanda do caso real. Uma das formas é modelar comportamentos estocásticos através de uma representação determinística

utilizando intervalos de tempo. A capacidade da representação dos fatores econômicos e incertezas da demanda no modelo através de um reprojeto contínuo da cadeia de suprimentos é um desafio porque existe a tendência de rápidas mudanças econômicas no cenário global a todo instante de tempo e as empresas precisam estar preparadas para lidar com diferentes cenários econômicos. Para isso o modelo deve apresentar flexibilidade suficiente para adaptar-se diante das alterações da economia e do mercado (VIDAL *et al.*, 1997).

Melo *et al.* (2008) classificam a literatura conforme os aspectos considerados no processo de modelagem da cadeia de suprimentos, tais como, *single-layer*, *multi-layer*, *single-period*, *multi-period* e características estocásticas e determinísticas. É possível verificar que a maioria dos trabalhos, cerca de 82%, concentram-se em período único. Outro fato importante refere-se ao alto número de modelos determinísticos quando comparado com os modelos estocásticos.

As fontes de incertezas são devidas às demandas dos mercados consumidores, mudanças em taxas de câmbio, tempos de transporte (*transit-time*), retornos de produtos da logística reversa, *lead-times* da cadeia, custos de transporte, entre outros.

Os modelos desenvolvidos concentram-se em situações menos complexas como *single-layer* e *single-commodity*. Quando uma cadeia opera com *single-commodity* significa que atua com a produção e distribuição de um único tipo de produto ou mercadoria. Isto se dá devido à complexidade computacional do modelo gerado.

Sabri e Beamon (2000) construíram um modelo com incertezas e afirmam que trabalhar com incertezas de demanda e com a integração das informações estocásticas com decisões de localização de instalações em cadeia de suprimentos é um assunto ainda escasso.

Conforme Melo *et al.* (2008), pesquisas incorporam as incertezas da demanda dos mercados consumidores. Embora alguns modelos de localização de instalações de entidades da cadeia de suprimentos tem desenvolvido parâmetros estocásticos, a questão de robustez no desenvolvimento do projeto da cadeia não tem recebido muita atenção.

Papageorgiou (2009) defende que a presença de incertezas em cadeia de suprimentos deve ser discutida como uma questão importante na construção de um

modelo de otimização que irá suportar tomadas de decisão. O autor considera que a inclusão de incertezas na demanda no projeto da cadeia de suprimentos é importante para facilitar o cálculo do retorno esperado de investimentos realizados e também para avaliar o estado atual e previsões futuras dos resultados operacionais com base nos riscos associados às incertezas de demanda que a empresa está submetida.

Um projeto de cadeia de suprimentos é construído para ser utilizado por um período considerável de tempo durante o qual muitos parâmetros podem mudar. Se o comportamento probabilístico está associado com parâmetros incertos (ou por utilizar distribuições de probabilidade ou por considerar um conjunto de cenários discretos, cada qual com sua probabilidade subjetiva das ocorrências), então um modelo estocástico deve ser o mais apropriado para esta situação. Outra possibilidade de modelagem surge quando alguns parâmetros mudam no tempo de uma forma previsível (exemplos como níveis de demanda e custos). Neste caso, se os parâmetros de previsão são conhecidos, eles devem ser incluídos no projeto da cadeia de suprimentos para obter-se um modelo que possa lidar com mudanças futuras (Melo *et al.*, 2008).

Papageorgiou (2009) identificou diversas incertezas como uma importante questão para a utilização eficiente da capacidade e decisões robustas. Fontes críticas de incertezas foram identificadas, tais como a avaliação da demanda de insumos, preços, promoções de novos produtos e para incertezas em cadeia de suprimentos de ciclo fechado no montante de produtos não conformes ou no nível de produtos que retornam quando atingem final de dia útil.

Huang *et al.* (2009) estudaram três tipos de incertezas numa cadeia de suprimentos de ciclo fechado de uma indústria chinesa: incertezas do tempo de atraso do remanufaturamento e retorno dos produtos; custos do processo de recondicionamento; demanda dos clientes.

No trabalho de Cardoso *et al.* (2013), é adicionado incertezas na demanda dos produtos e incorporado a abordagem de árvore de cenários para análise de cenários de demanda otimista, realista e pessimista. O projeto do modelo de otimização deste trabalho será explorado detalhadamente no próximo capítulo a fim de compreender o processo e as implicações na construção do modelo de uma cadeia de suprimentos europeia.

A obtenção de um modelo de uma cadeia de suprimentos capaz de operar com parâmetros que possuem comportamento estocástico e que possibilite simulações de

diferentes cenários de demanda é uma questão desafiadora. Para isso, as incertezas da demanda são representadas através de intervalos dentro dos quais as variáveis do modelo podem assumir valores fixos. Estes valores devem representar uma probabilidade média da ocorrência dos eventos de forma que o projeto apresente resultados similares ao cenário real.

A Tabela 1 classifica a literatura de acordo com algumas decisões típicas no projeto de cadeias de suprimentos como:

- Capacidade: refere-se à capacidade produtiva das fábricas e capacidade de armazenagem dos depósitos da cadeia. De acordo com estes resultados é possível tomar decisão de investimentos para expansão de novo depósito ou fábrica, por exemplo;
- Estoques: refere-se à quantidade produtos finais ou matéria-prima armazenadas. Esta variável pode ajudar na obtenção de estoques de segurança que suportam variações de demanda ou sinalizar excessos de estoque na cadeia de suprimentos;
- Aquisição ou compras: está relacionada aos custos e quantidade de insumos ou matéria-prima adquiridas para produção do produto acabado. Estas informações ajudam no levantamento do valor empregado em compras e o impacto nos resultados operacionais da cadeia;
- Produção: refere-se aos volumes de produção das fábricas e a quantidade que o modelo decidiu produzir em cada fábrica. Estes valores são utilizados para projetar custos com mão-de-obra e manutenções nas máquinas, por exemplo;
- Roteamento: refere-se as rotas dos fretes estabelecidos nos fluxos de transporte entre as entidades da cadeia de suprimentos. O modelo pode ser projetado para otimizar rotas e reduzir custos logísticos de transporte;
- Modais de transporte: refere-se a escolha do modal de transporte que a cadeia utiliza para a distribuição dos produtos. A escolha do modal de transporte ideal depende da quantidade que será transportada, a confiabilidade do frete

desejado, o tempo desejado para entrega da mercadoria, entre outros. Os principais modais são por rodovia, ferrovia, mar, aéreo, entre outros.

Na Tabela 1, é possível verificar que compras, roteamento e escolhas de modais de transporte não tem recebido muita atenção. Isto mostra que a literatura existente ainda está longe de combinar muitos aspectos simultaneamente relevantes para o projeto da cadeia de suprimentos (MELO *et al.*, 2008). As referências completas listadas na Tabela 1 estão disponíveis em Melo *et al.* (2008).

Conforme mencionado anteriormente, a inclusão de muitas variáveis e restrições traz maior complexidade ao modelo. Isso pode ocorrer quando as decisões táticas e operacionais são integradas com decisões estratégicas da cadeia.

Tabela 1: Fatores de decisão em projeto de CS.

Autor (es)	Capacidade	Estoque	Aquisição	Produção	Rotas	Modelos de Transporte
Aghezzaf, E. (2005)	✓	✓				
Aksen e Altinkemer, (2008)					✓	
Ambrosino e Scutellà, (2005)		✓			✓	
Amiri, A. (2006)	✓					
Avittathur <i>et al.</i> (2005)		✓				
Barahona e Jensen, (1998)		✓				
Carlsson e Runnqvist, (2005)						✓
Chakravarty, A. K., (2001)				✓		
Chan <i>et al.</i> (2001)					✓	
Cordeau <i>et al.</i> (2007)			✓	✓		✓
Daskin <i>et al.</i> (2005)		✓				
Dogan e Goetschalckx, (1999)		✓		✓		
Erlbacher e Meller, (2000)		✓				
Eskigun <i>et al.</i> (2005)						✓
Fleischmann <i>et al.</i> (2006)	✓			✓		
Guillén <i>et al.</i> (2005)	✓	✓		✓		
Hinojosa <i>et al.</i> (2000)		✓	✓			
Hugo e Pistikopoulos, (2005)	✓			✓		
Hwang, H. -S., (2002)					✓	
Jang <i>et al.</i> (2002)		✓	✓	✓		
Jayaraman e Pirkul, (2001)				✓		
Jayaraman <i>et al.</i> (2003)		✓		✓		
Ko e Evans, (2007)	✓					
Kouvelis e Rosenblatt, (2002)				✓		
Levén e Segerstedt, (2004)	✓	✓				
Lieckens e Vandaele, (2007)	✓	✓				
Lin <i>et al.</i> (2006)		✓				
Lowe <i>et al.</i> (2002)	✓			✓		
Ma e Davidrajuh, (2005)		✓			✓	
Melachrinoudis e Min, (2000)	✓					
Melachrinoudis e Min, (2007)				✓		
Melachrinoudis <i>et al.</i> (2005)	✓			✓		

Autor (es)	Capacidade	Estoque	Aquisição	Produção	Rotas	Modelos de Transporte
Melo <i>et al.</i> (2006)	✓	✓	✓	✓		
Min e Melachrinoudis (1999)		✓				
Min <i>et al.</i> , (2002)		✓				
Miranda e Garrido, (2004)		✓				
Nozick e Tunquist, (2006)		✓				
Pirkul e Jayaraman, (2001)				✓		
Romeijn <i>et al.</i> (2002)		✓				
Sabri e Beamon, (2000)				✓		
Schultmann <i>et al.</i> (2003)	✓					
Shen e Qi, (2007)		✓				
Shen, Z. -J.M. (2006)		✓				
Shen <i>et al.</i> (2003)		✓				
Shu <i>et al.</i> (2005)		✓				
Snyder <i>et al.</i> (2006)		✓				
Sourirajan <i>et al.</i> (2007)		✓				
Srivastava, S. K. (2008)	✓					
Syam, S. S. (2002)		✓				
Teo e Shu, (2005)		✓	✓			
Tuzun e Burke, (1999)					✓	
Ulstein <i>et al.</i> (2006)	✓					
Van Ommeren <i>et al.</i> (2006)	✓	✓				
Verter e Dasci, (2002)				✓		
Vila <i>et al.</i> (2006)	✓	✓		✓		
Wang <i>et al.</i> (2003)		✓				
Wilhelm <i>et al.</i> (2005)		✓	✓	✓		
Wouda <i>et al.</i> (2002)				✓		✓
Wu <i>et al.</i> (2002)					✓	
Yan <i>et al.</i> (2003)			✓	✓		

Fonte: Adaptação de Melo *et al.* (2008)

Melo *et al.* (2008) comenta que o processo de revisão do projeto de redes tem se tornado mais frequente e tem alcançado um importante crescimento na literatura impulsionado pela globalização econômica. Este processo é também desencadeado pela expansão de oportunidades de novos mercados, fusões, aquisições e alianças estratégicas.

Além disso, a competição no mercado força as companhias para mudanças contínuas na configuração das cadeias de suprimentos como a realocação de algumas instalações ou atividades para áreas com condições econômicas mais favoráveis, por exemplo, regiões do país em que a mão-de-obra é mais barata ou há incentivos fiscais do governo.

2.3 LOGÍSTICA REVERSA

A seguir, será apresentada a relevância do assunto logística reversa e uma revisão das principais publicações dos últimos anos que envolvem estudos sobre projeto de cadeias de suprimentos que trabalham com atividades de logística reversa, remanufaturamento e ciclo fechado. Na literatura, a logística reversa pode ser dividida em problemas de planejamento onde a rede reversa é integrada com a rede direta e estão totalmente concentradas em atividades de remanufaturamento de produtos. O termo utilizado para se referir a cadeias que atuam com logística reversa é *closed-loop network* que significa cadeias que operam com ciclo fechado, ou seja, redes que trabalham com a recuperação de produtos.

Para Carter e Ellram (1998), o ponto que estimula o aumento de interesse em Logística Reversa é o aumento da consciência ambiental dos clientes que procuram por produtos de indústrias que se importam com esta causa.

Existe ainda a necessidade de integrar alguns fatores nos modelos existentes para aumentar a flexibilidade, permitindo a aplicação de diferentes tipos de casos de cadeia de suprimentos. Um fator importante que deve ser considerado é a integração das atividades do sentido direto e de logística reversa numa forma detalhada alinhadas com a dinâmica da cadeia de suprimentos (CARDOSO *et al.*, 2013).

De acordo com Guide *et al.* (2000) e Póvoa *et al.* (2009), cadeias de suprimentos com *loop* fechado tem aumentado sua importância na prática industrial, devido à diminuição do ciclo de vida dos produtos e a redução da margem de lucro das empresas.

Dowlatshashi (2000) afirma que estes acontecimentos fazem uma pressão na indústria para se adaptar ao conceito *green manufacturing*, incluindo a reutilização de produtos que seriam descartados para melhorar a imagem e a vantagem competitiva da empresa. O autor adiciona que o remanufaturamento é lucrativo pelo ponto de vista econômico. Os custos de retrabalho são tipicamente 40-60% dos custos de produção de um produto novo.

Guide *et al.* (2000) defende que a reutilização de produtos do mercado é uma prática comum em muitas indústrias, incluindo o ramo de fotocopiadoras, computadores, telecomunicações, equipamentos, partes automotivas, móveis de escritório e pneus. As vendas anuais de produtos reconicionados estão dentro de 53

bilhões de dólares e mais de 73.000 empresas nos Estados Unidos estão engajadas em alguma forma de reaproveitamento de produtos que seriam descartados.

Já Mitra (2005) reforça que pesquisas sobre o assunto acondicionamento de produtos não conformes tem aumentado devido às exigências da legislação dos governos para que as indústrias assumam responsabilidade da recuperação de produtos não conforme do mercado, ao invés de descartá-los no meio ambiente. Em 2005, Estados Unidos e Europa começaram a exigir a reciclagem de produtos estimulando indústrias e companhias a reduzir impactos ambientais.

No Brasil, o consumo consciente e a procura por produtos de empresas que respeitam o meio-ambiente e preocupam-se com meios de produção sustentáveis tem aumentado nos últimos anos devido a campanhas globais de conscientização ambiental. A legislação brasileira que regulamenta a indústria e que realiza auditorias de sustentabilidade vai ao encontro dos incentivos fiscais oferecidos pelo próprio governo. Isso ocorre porque as indústrias constroem fábricas em locais que o governo oferece incentivos de prorrogações fiscais e, em contrapartida, estimula fluxos logísticos de distribuição e remanufaturamento de grandes distâncias e *transit-time*, aumentando a emissão de gás carbônico na atmosfera. Por isso, questões que envolvem custos operacionais logísticos e preocupação com meio-ambiente são conflitantes e devem estar alinhadas com o objetivo da empresa no projeto da cadeia de suprimentos.

No projeto da cadeia de suprimentos deve ser considerado além das atividades de logística do sentido direto de produção, armazenagem e distribuição, mas também atividades de logística reversa que colaboram com práticas sustentáveis de recuperação de produtos e contribuem para a redução de descartes no meio ambiente.

Diversos autores contribuíram com a criação de modelos de Programação Linear Inteira Mista de cadeias de suprimentos que operam com logística reversa como será apresentado nos próximos parágrafos. A quantidade de publicações que tem concentrado seus estudos na elaboração de modelos evidencia a relevância do tema.

Fleischmann *et al.* (2001) consideraram a integração das atividades de distribuição do fluxo direto e reverso e contribuíram com uma formulação genérica de programação inteira. Estes pesquisadores mostraram que existe um potencial de redução de custos se for empreendida uma visão integradora ao invés de um projeto sequencial de uma rede de distribuição nos sentidos direto e reverso.

Em ambos os artigos, Jayaraman *et al.* (2003) e Fleishmann *et al.* (2001), as variáveis de decisão estavam nos fluxos no sentido direto e reverso entre as instalações dos centros de coleta e remanufaturamento, das fábricas e centros de distribuição.

A integração das atividades de logística reversa com o fluxo normal lida com problemas complexos de *Supply Chain Network Design - SCND*. A quantidade de instalações tem aumentado devido ao crescimento de instalações dedicadas para o recuperação de produtos, aumentando a complexidade da rede (Melo *et al.*, 2008).

Mitra (2005) também desenvolveu um modelo de otimização da receita a partir da recuperação de produtos. Salema *et al.* (2006; 2009) também desenvolveram um modelo com formulação de Programação Linear Inteira Mista para uma cadeia de suprimentos que opera com logística reversa.

Também, Amin e Zhang (2012) propõe uma formulação PLIM para otimizar uma cadeia de suprimentos com ciclo fechado baseado em ciclo de vida dos produtos.

Melo *et al.* (2008) inclui nos estudos de modelos de cadeias de suprimentos características de logística reversa o conceito de cadeia de suprimentos verde, ou seja, cadeias que são desenhadas estrategicamente para operar de maneira eco-eficiente e sustentável respeitando o planeta com ações de redução do impacto ambiental. O objetivo dos autores foi minimizar a distância e custos operacionais das instalações da cadeia.

No trabalho de Cardoso *et al.* (2013) é desenvolvido um modelo utilizando-se como base uma formulação de Programação Linear Inteira Mista para o projeto e planejamento de uma cadeia de suprimentos com fluxos reversos que operam simultaneamente ao fluxo normal de produção, distribuição e atividades de logística reversa. No estudo é considerado também incertezas na demanda utilizando a abordagem de construção de cenários em árvores. Como objetivo principal o modelo define a maximização do valor presente líquido esperado (VPLE) e fornece o detalhamento dos resultados do dimensionamento e localização das fábricas, *warehouses e retailers*, definições dos processos para instalação, estabelecimento do fluxo direto e reverso e níveis de estoque. O modelo é aplicado no estudo de caso de uma cadeia de suprimentos Europeia. Considera-se uma estrutura de cadeia de suprimentos genérica com quatro elos permitindo para o modelo da cadeia de

suprimentos operar suas principais atividades: produção, montagem, estoque, distribuição, coletas, limpezas, remanufaturamento e descarte de produtos.

A proposta do modelo criado por Cardoso *et al.* (2013) foi aplicar diferentes tipos de redes, variando de uma cadeia de suprimentos padrão para uma cadeia de suprimentos *closed-loop* onde clientes podem receber produtos diretamente das fábricas, *retailers* ou *warehouses*. Fluxos reversos incluem fluxos para descarte, reprocessamento ou re-embalagem dos produtos. A aplicação do modelo mostrou que a incorporação de logística reversa, embora cara, pode resultar em um aumento dos benefícios econômicos com a recuperação dos produtos. Tal estudo mostrou que adicionar incertezas é essencial para desenvolver uma estrutura de rede robusta. Também a possibilidade de ter uma rede de distribuição dependente dos cenários, permite uma boa flexibilidade e ajustes para as trocas de produtos levando ao aumento do VPL (CARDOSO *et al.*, 2013).

Dondo e Méndez (2016) propõe a modelagem de uma cadeia que trabalha com *green logistics*, onde existem fluxos de distribuição no sentido direto da cadeia, ou seja, produtos que saem da fábrica para os mercados consumidores e fluxos reversos de coleta de materiais para reciclagem, recuperação e acondicionamento dos produtos para retornarem ao mercado. As rotas de distribuição do fluxo direto da cadeia devem estar sincronizadas com a coleta dos produtos reprovados nos mercados consumidores a fim de aproveitar o mesmo frete para o fluxo reverso.

Muitos autores tem utilizado nas suas pesquisas estes conceitos para se referir à cadeias de suprimentos que trabalham com características sustentáveis. A partir de agora, serão apresentados os principais autores envolvidos em estudos relacionados ao processo de remanufaturamento em cadeias de suprimentos que centralizam esta atividade logística na construção do projeto.

Remanufaturamento é uma das atividades de logística reversa, o qual tem ganho importância devido à legislação governamental de incentivar pessoas e corporações para proteção do meio ambiente. Pesquisas têm abordado o desenvolvimento de modelos de cadeias de suprimentos que operam no contexto de logística reversa (MITRA, 2005).

Inderfurth *et al.* (2001) foram os primeiros a abordar o problema de remanufaturamento estocástico com múltiplas opções de reuso. Eles derivaram de uma política de revisão periódica para alocação ótima dos itens reutilizáveis de diferentes

processos de remanufaturamento e opções de descarte conforme retornos e demandas estocásticas.

A integração do controle de estoque de produtos reconicionados com produtos novos recém produzidos apresenta alguns problemas. Primeiro de tudo, existem três tipos de estoque: produtos retornados do mercado, produtos reconicionados e produtos novos que acabaram de ser produzidos.

A maioria dos artigos que abordam o assunto de logística reversa considera uma opção única de reutilização, ou seja, independente do nível de qualidade dos produtos retornados, eles podem ser recuperados para o mesmo nível de qualidade iniciais. (MITRA, 2005).

Em Marín e Pelegrin (1998), o fluxo reverso de produtos ocorre diretamente para as fábricas reutilizarem na produção. Similar ao modelo estudado por Lee e Dong (2008) onde produtos retornados são reconicionados na mesma instalação que ocorrem os atividades de produção que atendem o fluxo normal da cadeia.

Como nem todos os produtos remanufaturados podem ser vendidos devido ao nível de qualidade mínima exigida alguns produtos precisam ser descartados. Lu e Bostel (2007) consideraram a possibilidade de instalações aptas para realização de descarte de produtos retornados do mercado que não podem ser recuperados.

A decisão do local de realização do retrabalho dependerá do conhecimento técnico especializado, da infraestrutura necessária e do melhor custo-benefício, pois a indústria não pode decidir que o serviço seja realizado por um fornecedor terceiro porque apresenta melhor custo porém estará agredindo o meio-ambiente ou utilizando mão de obra irregular. Foi verificado que a indústria irá optar por retrabalhar o produto se o custo do reconicionamento for menor que o custo de produção de um novo produto ou irá optar pelo descarte em casos de que não exista tecnologia necessária para realização do serviço. O desenvolvimento de tecnologia para retrabalho tem sido tema de trabalho em muitas indústrias como Boeing, Caterpillar, General Eletric, IBM, Kodak, Volkswagem and Xerox (XIONG *et al.*, 2013; 2016).

Xiong *et al.* (2013; 2016) avaliam o desempenho da cadeia de suprimentos em dois casos distintos: quando o produto retorna do mercado para ser reconicionado pela fábrica e quando o produto retorna direto para um fornecedor contratado para realizar este serviço e retornar com o produto. A fábrica possui *know-how* para retrabalhar o produto do mercado, mesmo que esta operação seja mais cara que a

fabricação de um produto novo. Porém deve ser avaliado a disposição do cliente de pagar por um produto retrabalhado. A sugestão dos autores é a criação de um roteiro para gerenciamento da melhor escolha para o retrabalho. Os autores criam funções para cálculo dos custos de realização do retrabalho no fornecedor e na própria fábrica.

Existe um nível de qualidade aceitável para produtos remanufaturados que também podem ser oferecidos no mercado com preços diferenciados. Esta situação proporciona elevação da receita, ou seja, definir preços diferenciados de produtos reconicionados de acordo com os diferentes níveis de qualidade atingidos no processo de remanufaturamento de tal forma que a receita total é maximizada. Em Mitra (2005), o objetivo do trabalho foi determinar preços de produtos reconicionados e remanufaturados de tal modo que a receita seja maximizada.

A Figura 1 mostra uma estrutura de logística reversa que realiza o processo de remanufaturamento dos produtos retornados do mercado. Esta estrutura é similar a estrutura apresentada por Fleischmann *et al.* (2000) e Bloemhof-Ruwaard *et al.* (1999). As atividades de logística reversa devem ser integradas com as atividades do fluxo normal. Porém, esse alinhamento simultâneo de atividades adiciona um grau de complexidade na cadeia, uma vez que a cadeia de suprimentos também opera num alto nível de incertezas em termos de tempos, quantidade e qualidade dos produtos retornados. (MITRA, 2005).

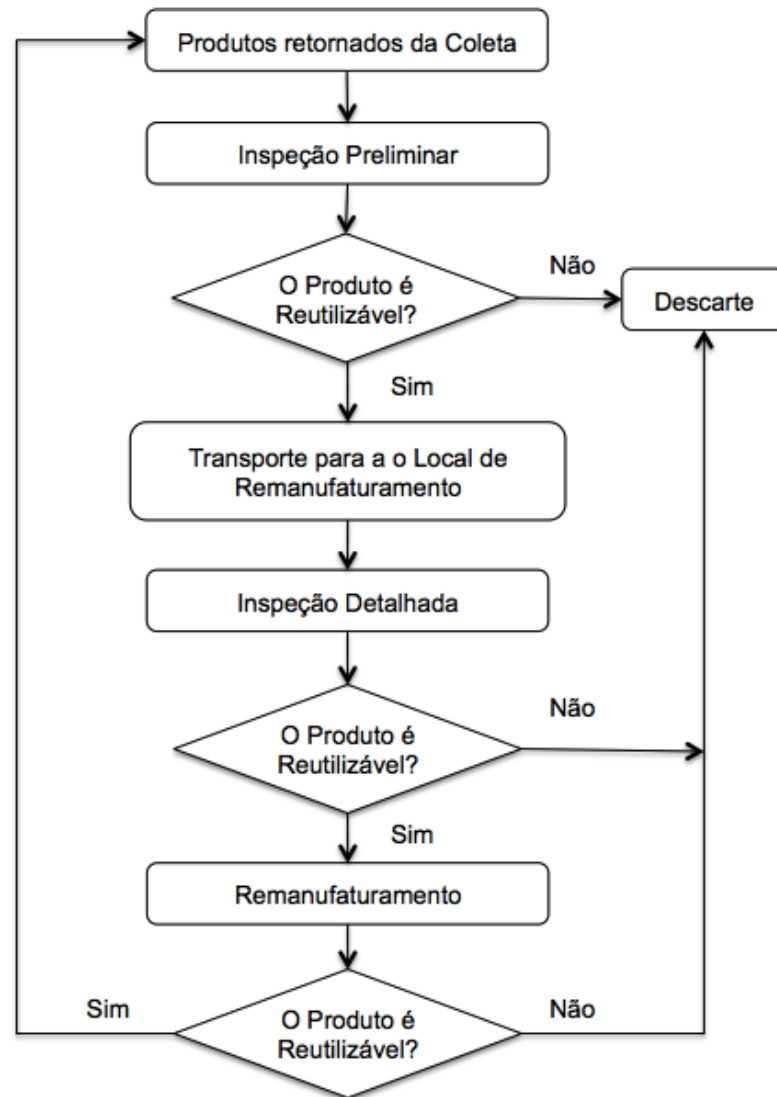


Figura 1: Estrutura de Logística Reversa.

Fonte: Adaptação de Mitra (2005)

Guide *et al.* (2003) também colaboraram para a questão de remanufaturamento através do desenvolvimento de uma heurística e uma análise de sensibilidade fornecendo importantes *insights* direcionadores para serem utilizados na gestão da aquisição de produtos novos, produtos que passaram por remanufaturamento e no problema de gerenciamento da receita desses dois produtos. Os direcionadores apresentados foram: revisão dos custos com compra de insumos, mão de obra, recondicionamento e descarte, verificação dos *lead-times* das tecnologias de produção e retrabalho e taxas de utilização das máquinas, e verificação dos ativos (estoque,

máquinas e prédios). Após a verificação destes direcionadores os autores concluíram que a atividade de recuperação de produtos reprovados é uma prática lucrável.

A seguir é apresentada uma revisão dos autores que exploram o conceito cadeia de suprimentos com ciclo fechado no seu projeto. Este conceito é semelhante à cadeias de suprimentos com logística reversa. Durante a pesquisa bibliográfica notou-se o surgimento do novo termo *loop* fechado.

Os autores Jayaraman *et al.* (2003), Fleischmann *et al.* (2001) e Salema, Póvoa e Novais (2006; 2009) consideram nas suas pesquisas estudos de Cadeia de Suprimentos *Closed-Loop* (cadeias que trabalham com ciclo fechado).

Jayaraman *et al.* (2003) propôs uma abordagem analítica de otimização do planejamento e controle de produção de uma cadeia de suprimentos que opera com fechamento de *loop*. Os autores Shi *et al.* (2011) estudaram o problema de planejamento da produção para um sistema multi-período de *loop* fechado, o qual a fábrica tem dois canais para disponibilizar produtos: através da produção de novos produtos e remanufaturamento dos produtos coletados.

Os autores em Georgiadis *et al.* (2006) desenvolveram um modelo dinâmico para contratação e expansão das capacidades das instalações que realizam coletas para remanufaturamento de um único produto de uma cadeia de suprimentos com *loop* fechado.

Zhalechian *et al.* (2016) realiza um estudo de caso de uma cadeia de suprimentos aplicando o modelo de algoritmo metaheurístico que considera uma cadeia sustentável que atua com logística reversa sob ação de uma combinação de incertezas e avalia os impactos sociais, ambientais e econômicos da sua atuação. O artigo apresenta um Modelo CLSC - *Closed-Loop Supply Chain* que atua com incertezas utilizando de Programação Não-Linear Inteira Mista (PNLIM). O autor considerou as restrições de capacidade de armazenagem como não lineares a partir da definição de limites de capacidade inferior e superior. O modelo proposto tem como objetivo minimizar custos totais de investimento, transporte, estoques e emissão de gases no transporte.

Os estudos de Zhalechian *et al.* (2016), foram direcionados para o projeto de uma cadeia sustentável que atua em múltiplos períodos e produtos com a intenção de fechar um *loop* na cadeia com a introdução de rotas, estoques e posicionamento das *locations* para melhor tomada de decisão para atendimento da demanda e redução dos

custos. O estudo propõe uma função objetivo que reduz a emissão de poluentes de uma cadeia de suprimentos que opera em *loop* fechado. Os autores utilizam um método de programação estocástica eficiente que opera com incertezas, é desenvolvido também, um algoritmo metaheurístico para solução de problemas de larga escala e aplicam o modelo num estudo de caso de uma indústria de TVs de LED e LCD.

O resultado do modelo mostra que a quantidade de centros de distribuição, pontos de venda no varejo e o número dos demais elementos da cadeia de suprimentos aumentam os custos logísticos de transporte, discutindo-se a quantidade ideal de veículos necessários para o atendimento dos fluxos de distribuição.

Os autores consideram o presente trabalho como um desafio para pesquisadores e cadeias do futuro que consigam alinhar expectativas de redução de custos logísticos, sustentabilidade e gestão eficiente do Planejamento.

Melo *et al.* (2008) classifica na literatura as pesquisas que estão dedicadas no contexto de logística reversa em cadeias de suprimentos que operam com ciclo fechado e com a recuperação de produtos. Foi possível verificar que apenas nove trabalhos introduziram nos modelos os fluxos direto e reverso simultaneamente, bem como instalações para fechamento do ciclo na rede. O Planejamento estratégico em cadeia de suprimentos para recuperação de produtos carrega forte semelhança com o planejamento das atividades do sentido direto. A principal diferença refere-se ao fato que os fluxos são reversos e os tipos de instalações mudam.

Contudo, conforme mencionado por Melo *et al.* (2008), até agora a literatura existente não tem sido capaz de mostrar que as diferenças entre cadeias que operam com e sem logística reversa podem render diferentes metodologias para o tratamento dos resultados dos modelos. Somente redes com ciclo fechado têm visto claramente a complexidade de problemas de SCND (Desenvolvimento de Redes de Cadeias de Suprimentos) em comparação com redes clássicas de cadeias que operam somente no sentido direto.

2.4 CARGA TRIBUTÁRIA EM CADEIA DE SUPRIMENTOS

No Brasil, um fator decisivo em projetos de cadeias de suprimentos é a legislação tributária brasileira. As indústrias precisam ficar atentas às atualizações das

regras tributárias para incluir os benefícios fiscais disponibilizados pelo governo. Estas atualizações na dinâmica tributária alteram constantemente o projeto da cadeia de suprimentos, porque um dos meios de incentivo do governo é alternar os Estados Brasileiros que irão reger uma norma diferenciada de alíquotas, a qual favorece temporariamente a emissão de notas fiscais com isenção de alíquotas de impostos, forçando muitas vezes empresas para construção de novas fábricas ou alternância dos volumes de produção entre as plantas já existentes. O grande objetivo do Governo é estimular a economia de regiões menos favorecidas reduzindo as taxas de desemprego e desenvolvendo cidades que antes não eram atrativas para as indústrias por questões logísticas e distanciamento.

Segue abaixo uma breve descrição dos principais impostos do Sistema Tributário Nacional que impactam no projeto de cadeias de suprimentos brasileiras.

- Imposto sobre Produtos Industrializados - IPI: Incide sobre produtos industrializados. Possui alíquotas que variam de 0 a 300%, este imposto não é recuperável. Ocorre na importação durante o desembaraço aduaneiro e na operação interna na saída do produto da indústria. Índice sobre o valor total de cada Nota Fiscal Emitida;
- Programas de Integração Social - PIS: Incide sobre o faturamento nas etapas de produção com alíquota fixa de 1,65%, este imposto é recuperável. A receita deste é destinada para o Financiamento do Seguro-Desemprego. O PIS também é uma forma de apuração da contribuição do IR;
- Contribuição para Financiamento da Seguridade Social - COFINS: Este imposto é recuperável. Alíquota fixa de 7,6%;
- Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços - ICMS: Possui 27 legislações em âmbito estadual com 44 alíquotas distintas para cada movimentação interestadual e dentro dos estados. Verificar Tabela 48 das Alíquotas nas Operações Interestaduais e internas em Anexo no presente trabalho.

A proposta dos autores Dyreng *et al.* (2015) foi verificar os documentos e regras da carga tributária que as empresas dos Estados Unidos utilizam para definir o projeto da cadeia de suprimentos a fim de reduzir o pagamento de impostos e aumentar o lucro da empresa.

As indústrias têm mostrado que estão atentas às oportunidades fiscais disponibilizadas pelo governo, o equilíbrio buscado nas finanças é realizado com a verificação dos rendimentos obtidos pelas filiais instaladas em regiões que apresentem benefícios fiscais somando-se com o montante dos impostos pagos pelas filiais que estão submetidas à uma alta carga tributária, a fim de verificar se o resultado final é atrativo (CLAUSING, 2003; COLLINS E SHACKELFORD, 1997; DHARMAPALA E RIEDEL, 2013; GUPTA E MILLS, 2002, e KLASSEN E SHACKELFORD, 1998).

Outros autores têm examinado o impacto da carga tributária no projeto de cadeias de suprimentos, mas somente dois trabalhos estudaram o equilíbrio de cadeias de suprimentos globais. Mintz e Weichenrieder (2010) realizaram um estudo de multinacionais alemãs. Já Lewellen e Robinson (2013) analisaram a estrutura patrimonial de multinacionais dos Estados Unidos para verificar a complexidade da rede. Primeiramente, os autores examinaram o efeito da quantidade de filiais das cadeias e a probabilidade da presença de filiais estrangeiras. Eles analisaram ainda o impacto da presença e da ausência de altas cargas tributárias na complexidade estrutural da cadeia, ou seja, verificaram o impacto dos altos impostos na quantidade de filiais de uma multinacional.

Desai *et al.* (2004), Devereux (2007), Grubert e Mutti (2000) afirmam que a carga tributária é considerada no gerenciamento de cadeias de suprimentos na decisão de abertura de filiais estrangeiras. Desai *et al.* (2004) verificaram, ainda, que a economia em países com baixa carga tributária é maior do que em países que apresentam alta carga tributária.

Governo e indústria estão focados no equilíbrio global de cadeias de suprimentos que atuam sob um sistema tributário nacional e internacional. Recebendo forte atenção os assuntos relacionados ao aumento de carga fiscal e o planejamento tributário nacional e internacional.

Markle e Shackelford (2012) contribuíram com a análise do impacto dos impostos no projeto de cadeias de suprimentos de empresas multinacionais localizadas nos Estados Unidos. Verificou-se que, se o planejamento fiscal focado na gestão dos

fluxos logísticos for efetivo é possível alcançar o aumento do lucro. Dessa forma, é instituída uma necessidade de ajustes no projeto das cadeias de suprimentos multinacionais dos Estados Unidos para suportar a carga tributária em que várias filiais estrangeiras estão submetidas.

Dyrenge *et al.* (2015) encontraram evidências que a indústria está atenta à legislação tributária e instaurando uma conduta dinâmica de reorganização do projeto da cadeia de suprimentos. Contudo, este artigo trouxe evidências que fatores tributários são importantes no projeto de cadeias de suprimentos de multinacionais norte-americanas. Os autores em Dyrenge *et al.* (2015) junto com Lewellen e Robinson (2013), introduziram uma nova abordagem para examinar o projeto de cadeias de suprimentos multinacionais norte-americanas olhando de perto os elos que compõem a cadeia global, incluindo filiais estrangeiras.

O estudo dos autores Zhang e Huang (2013) constataram que todos os elos das cadeias de suprimentos precisam utilizar da infraestrutura pública como estradas da malha rodoviária para realização das movimentações logísticas. Portanto, cada instalação da cadeia deve pagar impostos como um retorno do capital público.

Conforme Zhang e Huang (2013) as indústrias chinesas estão submetidas a carga tributária denominada Imposto sobre o valor total – VAT, o qual empresas e unidades de negócio possuem obrigação de pagamento. A carga tributária afeta o preço e a quantidade de produtos que saem de cada filial da cadeia de suprimentos.

A flutuação do VAT, o qual é influenciado pelo volume de produção das empresas chinesas, impacta os custos de produção e conseqüentemente o lucro da empresa. Mudanças no VAT são decididas pelo governo federal. As empresas podem fazer algumas alterações de localização das instalações das cadeias de suprimentos para alterar o montante fiscal, porém somente para alguns impostos específicos.

O método proposto no artigo dos autores Zhang e Huang (2013) pode ser utilizado para controlar os custos sobre a produção da indústria. Por exemplo, quando mudanças ocorrem em equipamentos e na produção da fábrica, na compra de matéria-prima de fornecedores, entre outros, o montante VAT irá oscilar.

Os autores reforçam que o modelo da cadeia de suprimentos pode apresentar dificuldades de funcionamento devido à sobrecarga de informações e da complexidade de incluir no projeto as regras tributárias estaduais, interestaduais, nacionais e internacionais numa quantidade grande de elos da cadeia que operam com grandes

volumes de produção. Porém, uma vez que o modelo econômico matemático é aplicado com sucesso, sempre fornecerá benefícios econômicos consideráveis para a cadeia de suprimentos.

Foram encontrados poucos trabalhos que abordam o impacto das questões tributárias na operação de uma cadeia de suprimentos, como o trabalho dos autores Kenn e Lockwood (2010) que apresentam uma contextualização desta questão na África. De modo geral, a literatura é escassa em relação a trabalhos de otimização que levam em conta aspectos fiscais na modelagem do problema.

Na próxima seção são apresentados os fatores adicionais que devem ser considerados no projeto de cadeias de suprimentos, conforme Melo *et al.* (2008).

2.5 FATORES ADICIONAIS

Para finalizar a discussão dos aspectos que alteram significativamente o projeto de cadeia de suprimentos são apresentados os fatores adicionais verificado por Melo *et al.* (2008). Os autores mencionam alguns fatores adicionais que devem ser incluídos em modelos de cadeias de suprimentos como aspectos financeiros (fatores internacionais, incentivos fiscais e restrições de *budget*), gerenciamento do risco (robustez, confiabilidade e riscos mútuos) e outras questões como realocação, *Bill of Material* (Lista de Materiais) e fatores de multi-períodos, a seguir descritos.

- Fatores financeiros: estão entre as questões de forte impacto na configuração de cadeias de suprimentos globais. Estes fatores são divididos em três categorias. A primeira categoria compreende fatores internacionais como taxas, impostos, tarifas, taxas de câmbio, custos de transferência e documentação local. A segunda categoria compreende incentivos financeiros e fiscais oferecidos pelo governo para atrair investimento de instalações em certas regiões do país. E a terceira categoria refere-se às despesas financeiras e o limite disponível no caixa para investimentos como expansão de capacidade produtiva e armazenagem, por exemplo. Quando o horizonte de planejamento inclui múltiplos períodos, as limitações de disponibilidade financeira para investimentos variam de período para período;

- Gerenciamento dos riscos: refere-se à prevenção da ruptura em cadeia de suprimentos, riscos de ruptura e atraso podem ser causados pela ocorrência de flutuações, como por exemplo o descolamento da demanda prevista e realizada, políticas de estoques incorretas, greves, barreiras comerciais, políticas governamentais locais e catástrofes naturais. Investir na obtenção de estoques de segurança que são capazes de proporcionar equilíbrio para a cadeia sem gerar excessos em estoque são caminhos comuns para proteger a cadeia de suprimentos contra o risco de ruptura. Problemas de confiabilidade não tem recebido muita atenção na literatura uma vez que os gerentes defendem que as interrupções no atendimento são ocasionais. Já a confiabilidade tem sido bastante estudada no contexto de modelos de localização das instalações. Uma forma de abordar a aleatoriedade nos modelos é considerar os efeitos dos riscos mútuos devido a demandas estocásticas;
- Outros aspectos: a realocação das instalações é um processo que consome tempo porque deve ser planejado cuidadosamente para evitar rupturas na cadeia de suprimentos. Alguns trabalhos consideram a capacidade de transferência gradual de localizações existentes para novos endereços durante um horizonte multi-período. Um aspecto importante que tem começado a receber atenção nos últimos anos refere-se a expansão da configuração das decisões de produção no planejamento estratégico das cadeias de suprimentos estendendo para análises de insumos e componentes recebidos de fornecedores. A BOM (*Bill Of Material*) é a lista de insumos e matéria-prima que compõe um produto acabado. A integração da BOM com a SCND (*Supply Chain Network Design*) tem sido reconhecida como um aspecto importante. Portanto, alguns artigos trocam alguns parâmetros ao longo do tempo, mas as decisões estratégicas de localização são feitas no início do horizonte de planejamento. Outros autores têm adaptado esta configuração para encontrar um configuração mono período robusta.

Não é comum encontrar um modelo que considere todos os fatores citados acima no projeto da cadeia, pois pode comprometer a solução do modelo com o aumento da complexidade da rede. Desta forma, é preciso realizar uma análise crítica

dos fatores relevantes que devem ser considerados no Projeto da Cadeia de Suprimentos. Melo *et al.* (2008) comenta que a complexidade de modelos de cadeias de suprimentos tem forçado decisões preliminares de planejamento para simplificação do modelo.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada uma revisão bibliográfica sobre Cadeia de Suprimentos (CS), Gerenciamento e Planejamento em CS, Logística Reversa e Fechamento de Ciclo em CS.

Foram discutidos os fatores principais que impactam no projeto de uma CS, tais como fatores econômicos, logísticos, de produção, armazenagem e distribuição, incertezas na demanda, e atividades de logística reversa. Neste aspecto, foram consideradas atividades de remanufatura, descarte, gerenciamento dos estoques de produtos em final de vida útil, e CS que operam com ciclo fechado (*Closed-Loop Supply Chains*). Uma revisão sobre o uso de modelos de otimização com funções objetivo de minimização ou maximização também é apresentada. O capítulo foi finalizado com a discussão do impacto das questões que envolvem a carga tributária nas operações em cadeias de suprimentos.

O projeto de uma cadeia de suprimentos deve apresentar todas características de produção, distribuição e armazenagem, logística reversa, regras tributárias e diferentes cenários de incertezas na demanda para que o modelo aproxime-se do caso real. E ainda, possibilitar projeções futuras de custos e resultados operacionais a fim de viabilizar a tomada de decisão para investimentos na empresa.

Nos próximos capítulos será apresentado um modelo de otimização de uma cadeia de suprimentos que atua com logística reversa, sob ação de incertezas na demanda e opera de acordo com as regras tributárias brasileiras a fim de captar os benefícios disponibilizados pelo governo federal.

3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema estudado neste trabalho é o de maximizar o Valor Presente Líquido (VPL) de uma cadeia de suprimentos brasileira que opera com atividades de logística reversa sob a ação de incertezas na demanda inserida num cenário com cargas tributárias. Neste capítulo, serão apresentadas as características do problema, iniciando-se com a estrutura da cadeia de suprimentos, a árvore de cenários, a configuração dos casos que serão analisados e as principais restrições que norteiam a tomada de decisão da operação desta rede. Em seguida, será apresentada a lógica tributária que a cadeia está inserida.

3.1 ESTRUTURA DA CADEIA DE SUPRIMENTOS

A cadeia de suprimentos estudada opera com atividades logísticas no sentido normal e reverso sob a ação de incertezas na demanda e num cenário com regras tributárias.

A estrutura da cadeia de suprimentos é formada por quatro elos: fábricas com um conjunto de tecnologias de processos instalados, centros de distribuição ou *warehouses*, onde os produtos finais são armazenados, pontos varejistas ou *retailers*, os quais armazenam os produtos finais e distribuem para o último elo da cadeia que são os mercados consumidores.

É considerado que no sentido normal da cadeia as entidades podem estabelecer fluxos de transporte somente entre nós adjacentes. No fluxo reverso os produtos são coletados nos mercados consumidores e entregues nos pontos varejistas até a entrega final nas fábricas para remanufaturamento ou descarte.

Produtos não conformes que apresentam defeitos irrecuperáveis são enviados para descarte. Produtos não conformes que apresentam defeitos recuperáveis e produtos em final de vida útil em condições adequadas são remanufaturados.

Na Figura 2 é mostrada uma representação da cadeia e dos fluxos de transporte possíveis. Os processos de tecnologia podem sofrer expansão de capacidade, se necessário, para atender a demanda dos mercados consumidores. As atividades de logística reversa são integradas com os fluxos direto e reverso quando os produtos retornam dos mercados consumidores para serem retrabalhados e disponibilizados novamente para os clientes.

O fluxo reverso consiste em diferentes tipos de produto, tais como, produtos em final de vida útil coletados no período de tempo t , que foram vendidos para o mercado consumidor no período anterior, produtos não conformes, que representam uma parte dos produtos do fluxo direto que são disponibilizados para os mercados consumidores em cada período de tempo t e os demais produtos retornados que são enviados para descarte, os quais representam um montante calculado como uma porcentagem do total de produtos que retornam dos clientes.

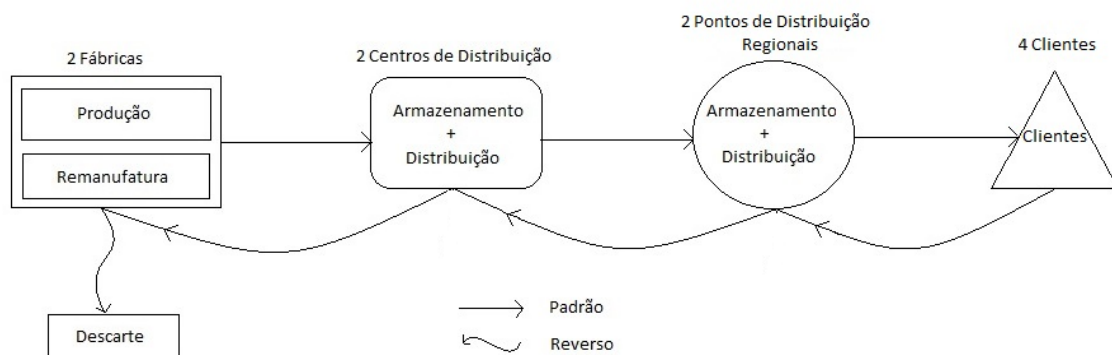


Figura 2: Representação da CS.

3.2 INCERTEZA NA DEMANDA

A incerteza na demanda por produtos dos mercados consumidores é modelada através da abordagem de árvore de cenários de Tsiakis *et al.* (2001). Esta árvore consiste num conjunto de nós e arcos, conforme a Figura 3. Nesta figura, R_t indica o nó raiz, O, R e P indicam, respectivamente, nós com condições otimista, realista e pessimista.

Cada nó s representa um estado possível e cada aresta representa uma evolução para o próximo período de tempo t . São associadas probabilidades para cada aresta que representam a probabilidade de ocorrência do cenário correspondente. A

probabilidade de cada nó na árvore de cenários é calculada pelo produto das probabilidades dos arcos do nó raiz até o nó considerado. A soma das probabilidades dos nós de cada período deve ser igual a um. O caminho do nó raiz até o nó folha representa um cenário.

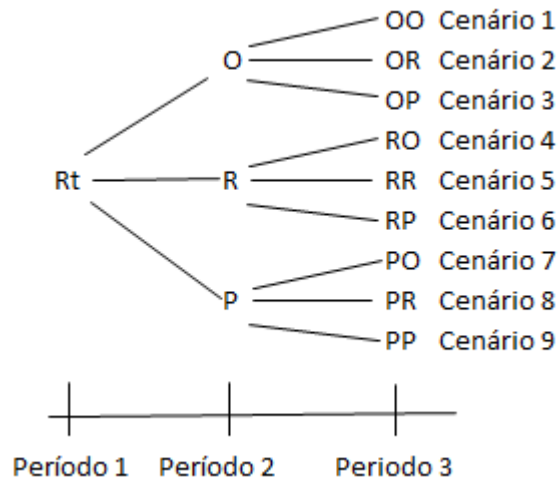


Figura 3: Árvore de cenários.

A função objetivo é a média do Valor Presente Líquido, obtida pelo VPL de cada cenário ponderado pela respectiva probabilidade (pb) do cenário. O cálculo do valor da demanda é feito da seguinte forma: para o primeiro período de tempo a demanda assume um valor inicial e nos demais períodos de tempo o valor da demanda é multiplicado por uma taxa de crescimento (df).

3.3 DADOS E RESTRIÇÕES OPERACIONAIS DA CADEIA DE SUPRIMENTOS

Nesta seção serão explicadas as principais restrições operacionais da cadeia de suprimentos e os dados utilizados no modelo. Os dados utilizados no projeto da cadeia de suprimentos foram adaptados devido a razões de confidencialidade. Foi atribuída uma escala menor nos valores utilizados.

A cadeia de suprimentos estudada é caracterizada por duas fábricas localizadas no estado do Paraná (fábrica 1 – $f1$) e Bahia (fábrica 2 – $f2$), onde dois processos operacionais de produção estão instalados (processo $i1$ e $i2$), um processo em cada fábrica, dois centros de distribuição nos estados de São Paulo ($w1$) e Bahia ($w2$), dois pontos varejistas localizados nos estados de São Paulo ($r1$) e Bahia ($r2$) e

quatro mercados consumidores localizados nas regiões sul ($m1$), sudeste ($m2$) e nordeste ($m3$ e $m4$).

Quando o fluxo reverso de produtos é considerado, as fábricas possuem também dois processos de desmontagem ($i3$ e $i4$) para descarte ou retrabalho de produtos não conformes ou em final de vida útil (os produtos podem retornar à fábrica para reaplicação de etiqueta e retorno aos mercados consumidores, por exemplo).

- **Horizonte de análise:** O estudo considera um conjunto de três períodos de tempo, cada um representa 5 anos, resultando no período total de 15 anos.
- **Nível de Atendimento da demanda:** O nível de atendimento da demanda em cada período de tempo é de 90%. Ou seja, não necessariamente toda a demanda requisitada deve ser atendida no período, mas o percentual de atendimento mínimo de 90% deve ser respeitado.
- **Giro do estoque de produtos:** A taxa de rotatividade dos estoques nos centros de distribuição e nos pontos varejistas é de 2,4 vezes/ano.
- **Vida útil do produto:** A vida útil do produto final $p5$ é de 1 período (5 anos).
- **Produtos retornados:** É considerado que, no mínimo, 8,5% dos produtos que são enviados para os mercados consumidores retornam, 3,5% do total de produtos vendidos para os clientes apresentam não conformidade e 5% atingem o final de vida útil. É considerado que 11% do total de produtos que retornam por não conformidade ou final de vida útil são descartados. Ressalta-se que estes parâmetros foram obtidos a partir da observação de dados práticos da empresa utilizados no orçamento do ano.
- **Investimento Inicial:** Os investimentos iniciais para construção das fábricas, processos de tecnologia de produção, centros de distribuição e pontos varejistas não foram considerados devido ao alto valor que impactaria no resultado final do período. Pois o investimento inicial da linha de produção do produto acabado foi de 15 milhões de unidades monetárias (\$ 15 milhões). Este valor refere-se ao investimento de uma máquina de grande porte em cada fábrica. Ou seja, somando

o investimento nas duas fábricas tem-se 30 milhões de unidades monetárias (\$ 30 milhões). Caso este valor fosse adicionado nos dados de entrada do modelo, os resultados operacionais apresentariam valores negativos, impossibilitando a análise. O trabalho de Cardoso *et al.* (2013) considera os investimentos iniciais porque é desenvolvido o projeto da cadeia, ou seja, com novas configurações das instalações. Neste trabalho não será verificado a instalação de novas entidades na cadeia.

3.3.1 Restrições de Capacidade

- **Capacidade de Produção nas fábricas:** As tecnologias de produção instaladas nas fábricas juntas têm capacidade inicial de 4 milhões de unidades/período/turno, multiplicando-se por 3 turnos, temos a capacidade máxima de 12 milhões de unidades/5 anos. É possível expansão da capacidade de produção, desde que pague o investimento.
- **Capacidade de armazenagem dos centros de distribuição e pontos varejistas:** Atualmente a capacidade de armazenagem é considerada ilimitada em face aos fluxos da cadeia. É possível expansão da capacidade de armazenagem, desde que pague o investimento. O investimento para expansão, contudo, não foi modelado.

3.3.2 Restrições dos Fluxos de Transporte

- **Capacidade dos fluxos de transporte direto:** Os limites para fluxo de materiais entre as entidades v e w são definidos conforme a capacidade de armazenagem do veículo contratado que opera cada movimentação, conforme Tabela 2. O frete das fábricas para os centros de distribuição assumem limite inferior de 80.000 e 70.000 unidades, espaço disponível de armazenagem em uma carreta paletizada, ou seja, as mercadorias são embaladas em caixas e alocadas em cima de estruturas de madeiras para facilitar a utilização das empilhadeiras. O frete entre centros de distribuição e pontos varejistas é de 60.000 unidades, espaço disponível de armazenagem do veículo. O limite inferior do fluxo dos pontos varejistas para os cliente é zero. O limite superior para fluxos de transporte é considerado como irrestrito, desde que seja múltiplo da capacidade do veículo.

Tabela 2: Limite inferior dos fluxos de transporte.

v	w	Limite Inferior
f1	f2	68000
f1	w1	80000
f1	w2	80000
f2	f1	68000
f2	w1	80000
f2	w2	70000
w1	r1	60000
w1	r2	60000
w2	r1	60000
w2	r2	60000

- **Capacidade dos fluxos de transporte reverso:** Os fluxos de transporte reverso foram considerados com capacidade ilimitada no projeto da cadeia de suprimentos para não limitar a operação de logística reversa.

3.3.3 Restrições dos Custos

- **Custo de compras de insumos:** A compra de insumos com fornecedores é ilimitada. Na Tabela 46 (Apêndice A) são ilustrados os custos dos insumos considerados no modelo para cálculo do custo de compras de insumos e custos para produção de uma unidade de produto acabado em cada fábrica. O produto acabado analisado é um perfume, o modelo considera quatro insumos principais da lista técnica, o custo do cartucho (p1), frasco (p2), da tampa (p3) e da essência (p4).
- **Custo de compras de produto final *out-sourcing*:** A compra de produto final com terceiros é considerada proibida. Desta forma, o parâmetro de custo é configurado com um valor muito alto devido à estratégia de internalização de todas produções.
- **Custos de produção:** Os custos de produção do produto final p5 nas fábricas f1 e f2 por período de tempo estão disponíveis na Tabela 46. Este custo é considerado o custo total que engloba custos variáveis, fixos e operacionais de produção do produto final p5 nas fábricas f1 e f2. Neste valor, já estão considerados os custos dos insumos orçados com custos logísticos da cadeia de abastecimento dos fornecedores.

- **Custos de retrabalho e descarte:** Os custos de retrabalho e descarte das tecnologias instaladas nas fábricas f1 e f2 são definidos na Tabela 46. Este valor refere-se aos custos com mão-de-obra para as atividades de retrabalho dos produtos retornados dos mercados consumidores. Estas atividades podem ser desde uma re-etiquetagem do produto acabado vencido de lotes em final de vida útil ou um simples retrabalho de seleção do lote de produtos não conformes, até mesmo limpeza do produto, testes de tração, entre outros.
- **Custos de transporte:** O custo de transporte dos fluxos de materiais entre as entidades está representado na Tabela 46. Estes custos são contratados com as transportadoras e englobam valor de pedágios, mão-de-obra, aluguel do veículo, combustível e seguro da carga. Os custos com valores altos caracterizam fluxos não autorizados por estratégia da empresa para redução de gastos com impostos. Os Custos de Transporte no Fluxo Reverso são os mesmos e não há distinção no preço.
- **Custo de armazenagem:** O preço do produto final p5 é alterado conforme as movimentações entre os fluxos na cadeia. O estoque inicial em todas as entidades é considerado zero.

É assumido um aumento de 20% por período de todos os custos e aumento de 30% da demanda por período.

3.4 REGRAS TRIBUTÁRIAS

A seguir é apresentada a dinâmica de funcionamento da malha tributária na cadeia de suprimentos iniciando-se pela lógica da carga tributária na fábrica f2, localizada no estado da Bahia. Logo em seguida são apresentadas as regras tributárias que operam sob a fábrica f1, instalada no estado do Paraná.

3.4.1 Tributação no estado da Bahia

As regras tributárias atuais em que a fábrica f2 está inserida são definidas a seguir, segundo um fluxo de operações contábeis. Estas regras referem-se somente ao imposto sobre circulação de mercadorias e serviços – ICMS.

1 - Fornecedores emitem as notas fiscais dos Insumos para a fábrica do estado da Bahia. O valor total da nota fiscal é calculado conforme ilustrado a seguir.

2 - Gera-se um crédito de impostos na fábrica da Bahia, pois a fábrica realizou o pagamento da nota fiscal para o(s) fornecedor(es).

3 - A fábrica transforma os insumos em produto acabado e emite nova nota fiscal do produto acabado para o centro de distribuição. Neste momento é gerado um débito na fábrica da Bahia. Não importa o tipo de produto que entra ou sai da fábrica e sim o valor dos impostos pagos e devidos. Quando o destinatário pagar a nota fiscal, ele adquire um crédito e o remetente continua com débito.

4 - O saldo atual de ICMS na fábrica Bahia é calculado da simples soma dos valores adquiridos de crédito e débito.

5 - O estado da Bahia, atualmente, é beneficiado pelo Programa Desenvolve Bahia. Desenvolve BAHIA é o Programa de Desenvolvimento Industrial e de Integração Econômica do Estado da Bahia. Este benefício corresponde a uma dilatação do prazo de até 72 meses, ou 6 anos, de até 90% do saldo devedor do imposto ICMS, conforme Decreto Nº 8.2015 de 03/04/2002 (BRASIL, 2002). O objetivo do programa é fomentar e diversificar a matriz industrial e agro industrial do Estado, com formação de adensamentos industriais nas regiões econômicas e integração das cadeias produtivas essenciais ao desenvolvimento econômico e social e à geração de emprego e renda no Estado.

3.4.2 Tributação no estado do Paraná

As regras tributárias atuais em que a fábrica f1 está inserida são definidas a seguir, também segundo um fluxo de operações contábeis. Estas regras referem-se somente ao imposto sobre circulação de mercadorias e serviços – ICMS.

1 - Fornecedores emitem notas fiscais dos insumos para a fábrica do estado do Paraná;

2 - Neste momento gera-se um crédito, pois a fábrica pagou o valor da nota fiscal do Fornecedor;

3 - A fábrica transforma os insumos comprados em produto acabado e emite nova nota fiscal para o centro de distribuição. Neste momento é gerado um débito na fábrica;

4 - O saldo atual do ICMS na fábrica f1 é calculado pela simples soma dos valores adquiridos no período de débito e crédito.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo descreveu as características e particularidades do problema abordado sendo fundamental para o direcionamento da formulação matemática do modelo.

Foi apresentado a estrutura da cadeia de suprimentos, os fluxos de transporte direto e reverso existentes na rede que definem a movimentação de materiais entre as entidades da cadeia, os cenários de incertezas na demanda realista, pessimista e otimista que são definidos pelas probabilidades de ocorrência de cada nó da árvore de cenários, as restrições operacionais de produção, armazenagem e distribuição. Foram apresentadas também as regras tributárias que a cadeia está submetida no estado da Bahia e Paraná.

No capítulo a seguir, desenvolve-se o modelo matemático em PLIM proposto pelo presente trabalho. Apresenta-se a formulação elaborada bem como as premissas e simplificações adotadas.

4 MODELO MATEMÁTICO

Neste capítulo, aborda-se o modelo matemático da cadeia de suprimentos proposto no presente trabalho. Descrevem-se as premissas adotadas, nomenclatura utilizada e as restrições que definem o modelo.

O projeto da cadeia de suprimentos foi construído de acordo com as características descritas no Capítulo 3. A cadeia de suprimentos opera sob incertezas na demanda com atividades de logística reversa num cenário com regras tributárias. Tem-se como objetivo maximizar o Valor Presente Líquido para as diferentes versões do modelo conforme comentado na seção anterior.

Para González (2003), o Valor Presente Líquido é um dos métodos de análise mais empregados, a qual reflete a riqueza do investimento no momento inicial, em valores monetários, utilizando um fluxo de caixa. Corresponde a um valor único, equivalente ao fluxo de caixa do investimento, convertido em valores presentes através de um fluxo de caixa descontado, permitindo a comparação de alternativas.

Aplicou-se uma abordagem baseada em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para o desenvolvimento do modelo, que foi adaptado de Cardoso *et al.* (2013).

4.1 PREMISSAS

As seguintes premissas e simplificações são adotadas:

- Conforme descrito no Capítulo 3, foram considerados somente os custos de compras dos quatro principais insumos do produto final p5. Esta simplificação foi adotada devido à quantidade de itens da lista técnica completa do produto final, a fim de reduzir a complexidade dos custos com insumos no planejamento do modelo da cadeia de suprimentos;
- Os estoques iniciais de insumo e produto acabado são considerados como zero no primeiro período de tempo;

- Conforme descrito no Capítulo 3, os investimentos iniciais com processos de tecnologia de produção das fábricas e os custos de obtenção dos espaços das fábricas, centros de distribuição e pontos varejistas foram considerados como zero. Esta premissa foi adotada para que a análise dos resultados de cada caso pudesse ser analisado sem impacto dos investimentos iniciais. O trabalho de Cardoso *et al.* (2013) considera os investimentos iniciais porque é desenvolvido o projeto da cadeia, ou seja, com novas configurações das instalações. Neste trabalho não será verificada a instalação de novas entidades na cadeia;
- No modelo foram considerados quatro mercados consumidores representando as regiões Sul, Sudeste e Nordeste no planejamento da cadeia de suprimentos;
- Os Custos dos Fluxos de Transporte do sentido direto e reverso são iguais e o modelo não limita a quantidade de peças por Veículo para Otimização de Transporte;
- Os custos de armazenagem dos estoques não são considerados;
- Os custos de transporte unitário não são considerados na modelagem, apenas o custo fixo de investimento do fluxo;
- O investimento inicial das fábricas não foi considerado no modelo devido ao alto custo, o qual impactaria negativamente os resultados operacionais da cadeia; o investimento inicial dos centros de armazenagem, por razões análogas, também não foi considerado;
- Os fluxos reversos de produtos não conforme e em final de vida útil representam uma quantidade fixa de 3,5% e 5% da quantidade de produtos que são enviados dos pontos varejistas para os mercados consumidores;
- O estudo considera um conjunto de três períodos de tempo, cada um representa 5 anos, resultando no período total de 15 anos.

A próxima seção aborda a nomenclatura utilizada no modelo matemático adaptado de Cardoso *et al.* (2013).

4.2 NOMENCLATURA

A seguir são relacionados os conjuntos, índices, variáveis e parâmetros utilizados no modelo.

4.2.1 Parâmetros

A Tabela 3 contém os parâmetros do modelo com domínio e descrição.

Tabela 3: Parâmetros do modelo.

Parâmetro	Descrição
dm_{pvt}	Demanda do produto p para entidade v no período de tempo t (uni)
df	Aumento de demanda fixo por período (%)
dNc/dEI	Porcentagem de produtos não conformes / final de vida útil que são enviados para descarte (%)
FCI_{up}	Limite superior do capital de investimento total (\$)
f_{pvt}	Preço unitário final do produto p vendido na entidade v no período de tempo t (\$/uni)
f_{ivt}^p f_{vt}^s	Investimento fixo associado ao processo i / Investimento fixo associado à capacidade de armazenagem da entidade v no período de tempo t (\$)
im_{iv}	Capacidade de produção inicial do processo i na entidade v (uni)
int_{pv}	Estoque inicial do produto p na entidade v (uni)
ir	Taxa de juros (%)
Ik_{vwt}	Investimento fixo associado ao estabelecimento do fluxo de transporte entre as entidades v e w no período de tempo t (\$)
lcp_{iv} $upcP_{iv}$	Limites inferior/superior de expansão de capacidade do processo i na entidade v (uni)
lcs_v $upcS_v$	Limites inferior/superior de expansão de capacidade de espaço de armazenagem da entidade v (uni)
nc_{el}	Porcentagem mínima de produtos que são coletados nos clientes por não conformidade/final de vida útil (%)
ncP_{iv} ncS_v	Valor máximo de expansão de capacidade do processo i na entidade v / Valor máximo de expansão de capacidade do espaço de armazenagem da entidade v (uni)
Oc_{ivpt}	Custo operacional do processo i na entidade v por unidade de produto final p no tempo t (\$/uni)
pb_s	Probabilidade de cada cenário S (%)
$p_{lo_{pvt}}$ $p_{up_{pvt}}$	Limites inferior/superior de compra de produto p na entidade v no período t (uni)
pt_{iv}	Porcentagem mínima de utilização da capacidade instalada do processo i na entidade v (%)
qr_{pp2}	Quantidade de insumos p2 necessários para produção de cada unidade de produto final p (uni)

Parâmetro	Descrição
m_{pvt}	Preço do insumo p comprado na entidade v no período de tempo t (\$/uni)
sv	Valor residual. Representa uma quantidade “salva” do valor em análise (%)
tg	Porcentagem mínima da demanda que deve ser atendida (%)
TP_p	Expectativa de tempo de vida do produto p (anos)
tor_v	Taxa de giro ou rotatividade do estoque na entidade v (%)
tr	Taxa de imposto (%)
up_{vwt} low_{vwt}	Limites superior/inferior de fluxo de materiais entre as entidades v e w no tempo t (uni)
V_{ivt}^p V_{vt}^s	Investimento inicial associado ao processo i / Investimento inicial associado à capacidade de armazenagem da entidade v no período de tempo t (\$)
vd_s	Variação de demanda no nó s

4.2.2 Conjuntos

A Tabela 4 mostra os conjuntos e subconjuntos utilizados no modelo com nome e descrição.

Tabela 4: Conjuntos e Subconjuntos do modelo.

Conjunto	Descrição
$E = Vf \cup Vw \cup Vr \cup Vm \cup Vd \cup Vn \cup Vg \cup Vh \cup Vz$	Entidades da cadeia de suprimentos
$G = Pr \cup Pf$	Produtos (insumo e final)
$H = Tm \cup Td$	Tecnologias (produção e desmontagem)
K	Nós da árvore de cenário
$T = \{1,2,3\}$	Períodos de tempo
$Vf = \{f1,f2\}$	Fábricas
$Vw = \{w1,w2\}$	<i>Warehouses</i>
$Vr = \{r1,r2\}$	<i>Retailers</i>
$Vm = \{m1,m2,m3,m4\}$	Mercados consumidores
$Vd = \{f1,f2\}$	Centros de desmontagem
$Vn = \{f1,f2\}$	Centros de descarte
$Vg = \{f1,f2\}$	Centros de produção (exceto desmontagem)
$Vh = \{f1,f2,w1,w2\}$	Centros que têm algum tipo de processo
$Vz = \{r1,r2,w1,w2\}$	Centros de armazenagem
$Pr = \{p1, p2, p3, p4\}$	Insumo ou matéria-prima
$Pf = \{p5\}$	Produto final
$Tm = \{i1,i2\}$	Tecnologias de produção
$Td = \{i3,i4\}$	Tecnologias de desmontagem/retrabalho/descarte

Na Figura 4 são ilustrados os conjuntos que estão relacionados com as entidades da cadeia de suprimentos.

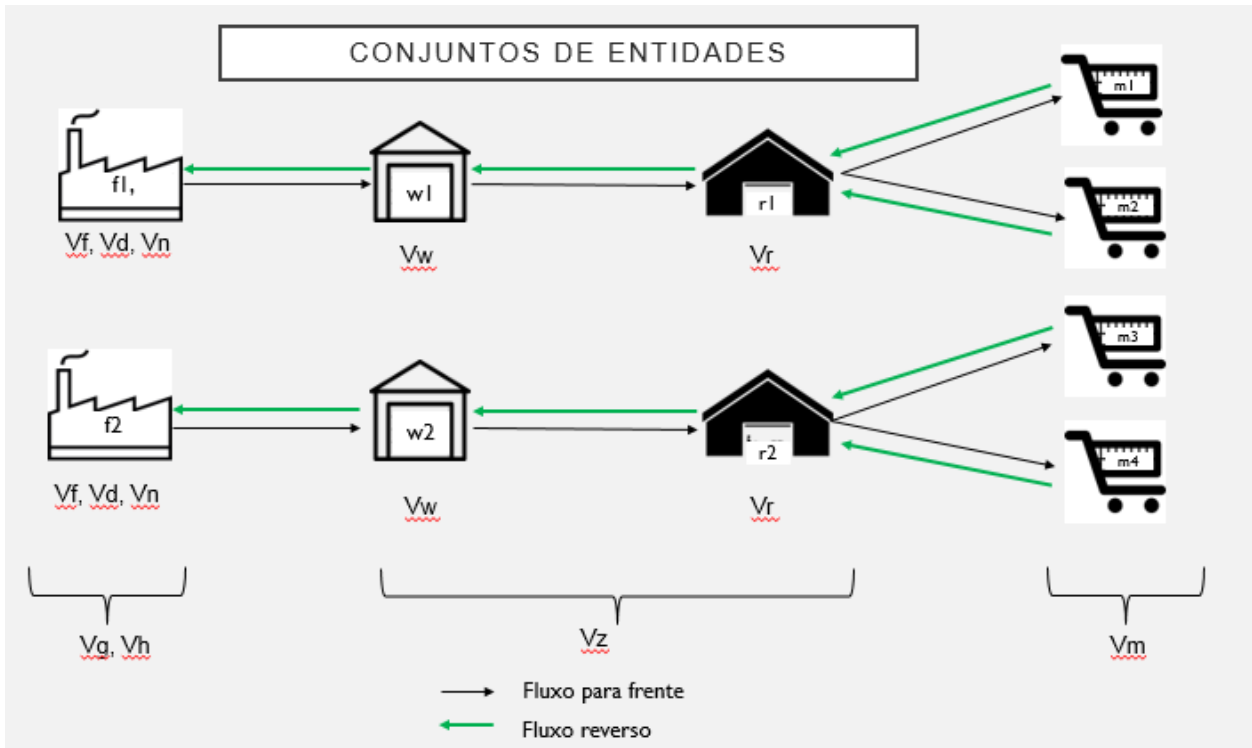


Figura 4: Conjunto de entidades.

4.2.3 Índices

A Tabela 5 ilustra os índices do modelo e o conjunto ao qual pertencem.

Tabela 5: Índices do modelo.

Índices	Descrição
$i \in H$	Tecnologias de processo
$t \in T$	Períodos de tempo
$p, p2 \in G$	Produtos
$v, w \in E$	Entidades da cadeia de suprimentos
$s, s2 \in K$	Nós da árvore de cenários

A seguir são descritas as entidades que compõe a cadeia de suprimentos: fábrica localizada no estado do Paraná ($f1$); fábrica localizada no estado da Bahia ($f2$); centro de distribuição localizado no estado de São Paulo ($w1$); centro de distribuição localizado no estado da Bahia ($w2$); ponto distribuidor varejista localizado no estado de

São Paulo ($r1$); ponto distribuidor varejista localizado no estado da Bahia ($r2$); mercado consumidor localizado na capital do estado de São Paulo ($m1$); mercado consumidor localizado no interior do estado de São Paulo ($m2$); mercado consumidor localizado na capital do estado da Bahia ($m3$); e mercado consumidor localizado no interior do estado da Bahia ($m4$).

A Tabela 6 apresenta os conjuntos esparsos do modelo. Apresenta-se o nome do conjunto, índices e uma breve descrição. Utilizou-se esta abordagem a fim de evitar a geração de índices inválidos no modelo.

Tabela 6: Conjuntos esparsos.

Conjunto	Descrição
$Lf1 = \{(v,w) : v \in Vf \wedge w \in Vw\}$	Fluxo no sentido direto da fábrica para o <i>warehouse</i>
$Lf2 = \{(v,w) : v \in Vw \wedge w \in Vr\}$	Fluxo no sentido direto do <i>warehouse</i> para o <i>retailer</i>
$Lf3 = \{(v,w) : v \in Vr \wedge w \in Vm\}$	Fluxo no sentido direto do <i>retailer</i> para o cliente
$Lf4 = \{(v,w) : v \in Vd \wedge w \in Vf\}$	Fluxo no sentido direto do centro de desmontagem para o centro de produção
$Lr1 = \{(w,v) : w \in Vm \wedge v \in Vr\}$	Fluxo no sentido reverso do cliente para o <i>retailer</i>
$Lr2 = \{(w,v) : w \in Vr \wedge v \in Vw\}$	Fluxo no sentido reverso do <i>retailer</i> para o <i>warehouse</i>
$Lr3 = \{(w,v) : w \in Vw \wedge v \in Vf\}$	Fluxo no sentido reverso do <i>warehouse</i> para a fábrica
$Lr4 = \{(w,v) : w \in Vd \wedge v \in Vn\}$	Fluxo no sentido reverso do centro de desmontagem para o centro de descarte
$F = Lf1 \cup Lf2 \cup Lf3$	Fluxos do sentido direto
$R = Lr1 \cup Lr2 \cup Lr3$	Fluxos do sentido reverso
$Jm1 = \{(i,p) : i \in Tm \wedge p \in Pr\}$	Associação entre a tecnologia de produção e insumo
$Jm2 = \{(i,p) : i \in Tm \wedge p \in Pf\}$	Associação entre a tecnologia de produção e produto final
$Jd1 = \{(i,p) : i \in Td \wedge p \in Pf\}$	Associação entre a tecnologia de desmontagem e produto final reprovado
$Jd2 = \{(i,p) : i \in Td \wedge p \in Pf\}$	Associação entre a tecnologia de desmontagem e produto final bom
$I = \{Jm1, Jd1\}$	Produtos que entram nas tecnologias de produção e desmontagem
$O = \{Jm2, Jd2\}$	Produtos que saem das tecnologias de produção e desmontagem
$Sset = \{(s,t) : s \in K \wedge t \in T\}$	Nós da árvore de cenário em cada período de tempo

4.2.4 Variáveis Contínuas

A Tabela 7 apresenta o nome das variáveis contínuas do modelo, domínio e descrição. Comenta-se que no formato proposto pelos autores um elemento sobrescrito não necessariamente será um índice a ser “percorrido” em uma tupla, mas somente um elemento de diferenciação de nome da variável. Um exemplo de tal fato pode ser observado na variável CE_{ivt}^p .

Tabela 7: Variáveis contínuas do modelo.

Variável Contínua	Domínio	Descrição
CE_{ivt}^p	≥ 0	Expansão de capacidade de produção da tecnologia i na entidade v no período de tempo t (uni)
CE_{vt}^s	≥ 0	Expansão de capacidade do espaço de armazenagem da entidade v no período de tempo t (uni)
CF_{st}	Q	Fluxo de caixa no nó s da árvore de cenário e no período de tempo t (\$)
C_{ivt}^p	≥ 0	Capacidade de produção do processo i na entidade v no período de tempo t (uni)
C_{vt}^s	≥ 0	Capacidade de armazenagem da entidade v no período de tempo t (uni)
D_{pvst}	≥ 0	Demanda do produto p na entidade v no nó s da árvore de cenário no período de tempo t (uni)
DP_t	≥ 0	Depreciação do capital em t (\$)
FCl	≥ 0	Capital de investimento fixo (\$)
FDC_t	Q	Fração do capital total depreciável que deve ser pago no período de tempo t (\$)
INV_{pvst}	≥ 0	Estoque do produto p na entidade v no nó s da árvore de cenário no período de tempo t (uni)
IL_{vst}	≥ 0	Nível de estoque médio na entidade v no nó s da árvore de cenário e no período de tempo t (uni)
Ini_{ipvst}	≥ 0	Fluxo de entrada do produto p associado com o processo i na entidade v no nó s da árvore de cenário no período de tempo t (uni)
Q_{pvwst}	≥ 0	Fluxo direto de produtos p enviados da entidade v para w no nó s da árvore de cenário no período de tempo t (uni)
QEL_{pvwst}	≥ 0	Fluxo reverso de produtos p em final de vida útil enviados da entidade w para entidade v no nó s da árvore de cenário no período de tempo t (uni)
QNC_{pvwst}	≥ 0	Fluxo reverso de produtos p não conformes enviados da entidade w para entidade v no nó s da árvore de cenário no período de tempo t (uni)
NE_{st}	Q	Receita líquida no nó s da árvore de cenário no período de tempo t (\$)
NPV_s	Q	Valor presente líquido (VPL) no nó s da árvore de cenário (\$)

Variável Contínua	Domínio	Descrição
Out_{ipvst}	≥ 0	Fluxo de saída do produto p associado com o processo i na entidade v no nó s da árvore de cenário e no período de tempo t (uni)
Pu_{pvst}	≥ 0	Quantidade de produtos p comprados pela entidade v no nó s da árvore de cenário e no período de tempo t (uni)
S_{pvst}	≥ 0	Vendas do produto p na entidade v no nó s da árvore de cenário e no período de tempo t (uni)

4.2.5 Variáveis Binárias

A Tabela 8 apresenta as variáveis binárias do modelo e descrição.

Tabela 8: Variáveis binárias do modelo.

Variável Binária	Descrição
X_{ivt}^p	1, se a capacidade do processo i na entidade v é expandida no período de tempo t 0, se caso contrário
X_{vt}^s	1, se a capacidade de armazenagem na entidade v é expandida no período de tempo t 0, se caso contrário
Y_{vwt}	1, se o fluxo de transporte direto entre as entidades v e w é estabelecido no período de tempo t 0, se caso contrário
$Y_{NC_{vwt}}$	1, se o fluxo de transporte reverso de produtos não conformes entre as entidades v e w é estabelecido no período de tempo t 0, se caso contrário
$Y_{EL_{vwt}}$	1, se o fluxo de transporte reverso de produtos em final de vida útil entre as entidades v e w é estabelecido no período de tempo t 0, se caso contrário

4.3 FUNÇÃO OBJETIVO

Foram particularizados dois modelos a partir da formulação base de Cardoso *et al.* (2013):

- (i) Modelo Caso A, sem logística reversa;
- (ii) Modelo Caso B com logística reversa;

A partir dos dois modelos desenvolvidos foram realizadas configurações particulares nos parâmetros e variáveis a fim de obter quatro versões a seguir elencadas:

- (i) Caso A1, sem logística reversa, com impostos;
- (ii) Caso B1 com logística reversa, com impostos;
- (iii) Caso B2 com logística reversa, com incertezas;
- (iv) Caso B3 com fluxos de transporte flexíveis.

O caso B3 é o caso completo do estudo com adicional de flexibilidade nos fluxos de transporte entre as entidades da rede, este modelo foi configurado com as características da cadeia de suprimentos brasileira que atua com logística no sentido direto e reverso, incertezas na demanda e regras tributárias.

A seguir, apresentam-se as equações utilizadas ou adaptadas de Cardoso *et al.* (2013) que definem a função objetivo e as restrições do caso B3, considerado o mais completo.

A expressão (1) é a função objetivo do modelo, a qual maximiza o resultado do Valor Presente Líquido (VPL) do período de tempo, considerando as probabilidades (pb) dos cenários. A função objetivo é a esperança matemática do Valor Presente Líquido, obtida pelo VPL de cada cenário ponderado pela respectiva probabilidade (pb) do cenário.

As expressões (1a) à (1g) são as equações utilizadas para alcançar o cálculo do NPV. As equações (1a) à (1c) são as mesmas utilizadas por Cardoso *et al.* (2013).

$$\text{Max} \sum_{s \in K} pb_s \times NPV_s \quad (1)$$

A equação (1a) calcula o NPV, conforme Ehrhard e Brigham (2010), como o somatório dos fluxos de caixa (CF_{st}) de cada período de tempo t no cenário S através da taxa de juros ir .

$$NPV_s = \sum_t \frac{CF_{st}}{(1 + ir)^t} \quad \forall s \in K \quad (1a)$$

A equação (1b) calcula o Fluxo de Caixa obtido em cada período de tempo, exceto o último, através da diferença entre a receita líquida e da fração de depreciação do capital (FDC_t).

$$CF_{st} = NE_{st} - FDC_t \quad \forall s \in K, t = 1, 2. \quad (1b)$$

O fluxo de caixa para o último período de tempo é obtido da equação (1c), onde é necessário levar em conta que parte do total do capital de investimento fixo pode ser recuperado no final do horizonte de tempo, utilizando um valor residual sv . Porém, neste trabalho, os investimentos iniciais não são considerados por apresentarem valores muito altos, os quais afetariam a análise dos resultados operacionais da cadeia.

$$CF_{st} = NE_{st} - FDC_t + sv \times FCI \quad \forall s \in K, t = 3 \quad (1c)$$

A receita líquida apresentada nas equações (1b) e (1c) é dada pelo cálculo da diferença entre as receitas e o custo total, segundo a equação (1d). A receita é determinada a partir das vendas através da multiplicação do preço do produto final (fp_{pvt}) pela quantidade de produtos entregues nos mercados consumidores em cada nó do cenário S (S_{pvst}) em cada período de tempo t . O custo total inclui a compra de matéria-prima que é calculada com o preço de cada insumo rm_{pvt} e a quantidade Pu_{pvst} que é comprada por cada entidade v em cada nó do cenário de árvore s em cada período de tempo t . Os custos operacionais de produção são dados pelo custo de cada processo de tecnologia instalado em cada entidade (Oc_{ivt}) e o respectivo fluxo de saída de cada nó de cenário (Out_{ipvst}). A equação (1d) foi adaptada de Cardoso *et al.* (2013) porque não foi considerado as parcelas de custo de transporte unitário, pois a cadeia do estudo atribui os custos de distribuição na ocorrência dos fluxos de transporte entre as entidades, conforme equação (1f).

$$NE_{st} = (1 - tr) \left[\sum_{v \in Vm} \sum_{p \in Pf} fp_{pvt} \times S_{pvst} - \sum_{v \in Vg} \sum_p rm_{pvt} \times Pu_{pvst} \right] - \sum_i \sum_{v \in Vh} \sum_{p \in Pf} Oc_{ivt} \times Out_{ipvst} + (tr \times DP_t) \quad (1d)$$

$$\forall s \in K, t \in T$$

A última parte da equação (1d) descreve a depreciação do capital investido. A depreciação do capital (DP_t) é dada pela equação (1e), mesma utilizada por Cardoso *et al.* (2013), onde o valor é igual ao custo original menos o valor residual (sv), o qual é uma estimativa do valor dos ativos que podem ser vendidos que são depreciados.

$$DP_t = \frac{(1 - sv) FCI}{NT} \quad \forall t \in T \quad (1e)$$

A equação (1f) define o Custo de Investimento Fixo Total (FCI), determinado pelo custo variável (fp_{pvt}) e investimentos fixos (v_{ivt}^p / v_{vt}^s) das capacidades dos processos de armazenagem, multiplicado pelas suas respectivas expansões, adicionado pelo custo do estabelecimento de cada fluxo lk_{vwt} de transporte no horizonte de tempo.

Além disso, os custos de transporte entre as entidades da cadeia de suprimentos (lk_{vwt}) são verificados através dos valores do parâmetro de cada fluxo disponíveis nas tabelas de dados do modelo, válidos para os respectivos fluxos de transporte em cada cenário de árvore s , o qual pode ser no sentido direto (Q_{pwwst}) ou reverso ($Q_{NC_{pwwst}}$ e $Q_{EL_{pwwst}}$).

A equação (1f) foi adaptada de Cardoso *et al.* (2013) porque não foi considerado a parcela de estoque inicial e depreciação do estoque, a fim que estes valores não interfiram nos resultados de produção e armazenagem do modelo.

$$\begin{aligned}
FCI = & \sum_i \sum_{v \in Vh} \sum_t \left(v_{ivt}^p \times CE_{ivt}^p + f_{ivt}^p \times X_{ivt}^p \right) \\
& + \sum_{v \in Vz} \sum_t \left(v_{vt}^s \times CE_{vt}^s + f_{vt}^s \times X_{vt}^s \right) \\
& + \sum_v \sum_w \sum_t lk_{vwt} \times \left(Y_{vwt} + YNC_{vwt} + YEL_{vwt} \right)
\end{aligned} \tag{1f}$$

Por fim, a equação (1g), mesma utilizada por Cardoso *et al.* (2013), define que o Capital Investido Fixo Pago é dividido em valores iguais por cada período de tempo. Notar que o termo NT define a cardinalidade do conjunto T , a qual, no estudo de caso, foi igual a três.

$$FDC_t = \frac{FCI}{NT} \quad \forall t \in T \tag{1g}$$

Em seguida, são definidas as restrições do modelo.

4.4 RESTRIÇÕES

Esta seção apresenta as restrições do modelo da cadeia de suprimentos para a realidade do estudo de caso da empresa considerada neste trabalho.

4.4.1 Restrições de Balanço de Massa e Limite de Compras

A equação (2), mesma utilizada por Cardoso *et al.* (2013), representa o Balanço de Massa para cada fábrica v e para cada produto p em cada nó s do cenário de árvore e para cada período de tempo t . A compra do produto p em cada entidade v (Pu_{pvst}) mais a quantidade de produtos que são produzidos na entidade v (Out_{ipvst}), mais a quantidade de produtos recuperados que são recebidos dos centros de retrabalho (Q_{pvwst}), deve ser igual ao total transportado da entidade v para os armazéns (Q_{pvwst}) mais a quantidade consumida na entidade v (In_{ipvst}).

$$\begin{aligned}
& Pu_{pvst} + \sum_{(i,p) \in Jm_2} Out_{ipvst} + \sum_{(w,v) \in Lf_4} Q_{pwwst} \\
& = \sum_{(v,w) \in Lf_1} Q_{pwwst} + \sum_{(i,p) \in Jm_1} Ini_{ipvst} \quad \forall p \in G, v \in V_f, (s,t) \in Sset
\end{aligned} \tag{2}$$

A inequação (3), mesma utilizada por Cardoso *et al.* (2013), apresenta o limite inferior e superior para compras de cada produto p (Pu_{pvst}) configurando um intervalo, o qual é dado pela disponibilidade de produtos nos mercados consumidores. As compras podem ser de insumos, matéria-prima ou produto final. Esta equação é utilizada para permitir e proibir a ocorrência de *outsourcing*, ou seja, a autorização de compra de produtos que são fabricados por terceiros.

$$plo_{pvt} \leq Pu_{pvst} \leq pup_{pvt} \quad \forall v \in E, p \in G \wedge (s,t) \in Sset \tag{3}$$

As equações de balanço de massa (4) à (9) foram adaptadas de Cardoso *et al.* (2013), no trabalho dos autores os processos de desmontagem, retrabalho e descarte são realizados nos armazéns e no estudo de caso da cadeia de suprimentos brasileira ocorrem nas fábricas.

Na equação (4) é modelado o balanço de massa para cada produto em cada centro de desmontagem para cada nó s do cenário de árvore e para cada período de tempo t . Então, o total de produtos p que são produzidos na entidade v (Out_{ipvst}) considerando todos processos de tecnologia permitidos, mais a quantidade de produtos não conformes e em final de vida útil que são recebidos de outra entidade w , deve ser igual ao fluxo de saída para outras entidades w (Q_{pwwst}) mais a quantidade de produtos que são consumidos pelo processo (Ind_{ipvst}), mais a quantidade de produtos não conformes e em final de vida útil que são enviados para descarte.

$$\begin{aligned}
& \sum_{(i,p) \in Jd_2} Out_{ipvst} + \sum_{(v,w) \in Lf_3} Q_{pwwst} \times nc + \sum_{(v,w) \in Lf_3} Q_{pwwst} \times el \\
& = \sum_{(v,w) \in Lf_4} Q_{pwwst} + \sum_{(i,p) \in Jd_1} Ind_{ipvst} \\
& + dNc \times \sum_{(v,w) \in Lf_3} Q_{pwwst} \times nc + dEl \times \sum_{(v,w) \in Lf_3} Q_{pwwst} \times el \\
& \quad \forall p \in G, v \in V_d, (s,t) \in Sset
\end{aligned} \tag{4}$$

A equação (5) representa o Balanço de Massa para todos os processos de tecnologia. A quantidade de matéria-prima ou produto acabado que é consumido pelo processo i instalado na entidade v no nó s do cenário de árvore no período de tempo t ($Inip_{2vst}$) deve ser igual ao somatório de todos os produtos p que são produzidos nos processos de tecnologia (Out_{ipvst}) multiplicados pela quantidade de entradas de produtos necessárias para produzir cada unidade de produto final p (qr_{pp2}).

$$Inip_{2vst} = \sum_{(i,p) \in O} Out_{ipvst} \times qr_{pp2} \quad \forall (i,p2) \in I, v \in V_f, (s,t) \in Sset \quad (5)$$

As equações (6) e (7) representam o Balanço de Massa nos Armazéns v , para o produto p para cada nó do cenário de árvore. Na parte esquerda da equação é considerado o estoque inicial do produto p , o qual é dado por int_{pv} para o primeiro período de tempo t (inequação 6) e $INV_{pvs2t-1}$ para os demais períodos (inequação 7), onde $s2$ representa o nó antecessor s no cenário de árvore, mais o fluxo direto recebido no armazém v de outras entidades w da cadeia de suprimentos no nó s do cenário de árvore no período de tempo t (Q_{pwwst}) mais a quantidade recebida de produtos não conformes (QNC_{pwwst}) e em final de vida útil (QEL_{pwwst}). Esta quantidade total deve ser igual à quantidade enviada para outras entidades (Q_{pwwst}), mais o estoque final (INV_{pvst}) e a quantidade de produtos não conformes e em final de vida útil que são enviados para os centros de retrabalho.

$$\begin{aligned} & int_{pv} + \sum_{(w,v) \in F} Q_{pwwst} + \sum_{(w,v) \in R} QNC_{pwwst} + \sum_{(w,v) \in R} QEL_{pwwst} \\ & = \sum_{(v,w) \in Lf2} Q_{pwwst} + INV_{pvst} + \sum_{(v,w) \in Lr3} QNC_{pwwst} + \sum_{(w,v) \in Lr3} QEL_{pwwst} \end{aligned} \quad (6)$$

$\forall p \in G, v \in V_w, (s,t) \in Sset | t = 1$

$$\begin{aligned} & INV_{pvs2t-1} + \sum_{(w,v) \in F} Q_{pwwst} + \sum_{(w,v) \in R} QNC_{pwwst} + \sum_{(w,v) \in R} QEL_{pwwst} \\ & = \sum_{(v,w) \in Lf2} Q_{pwwst} + INV_{pvst} + \sum_{(v,w) \in Lr3} QNC_{pwwst} + \sum_{(w,v) \in R} QEL_{pwwst} \end{aligned} \quad (7)$$

$\forall p \in G, v \in V_w, (s,t) \in Sset | t > 1$

As equações (8) e (9) definem o Balanço de Massa nos pontos varejistas. O estoque inicial (int_{pv}) para o primeiro período de tempo e $INV_{pvs2t-1}$ para os demais períodos mais o fluxo de produtos direto (Q_{pwwst}) e os dois tipos de produtos do fluxo reverso (QNC_{pwwst} e QEL_{pwwst}) enviados dos mercados consumidores, deve ser igual ao estoque final (INV_{pvst}), mais o fluxo direto (Q_{pwwst}) e reverso (QNC_{pwwst} e QEL_{pwwst}) de produtos que são enviados para os armazéns.

$$\begin{aligned}
& int_{pv} + \sum_{(w,v) \in F} Q_{pwwst} + \sum_{(w,v) \in R} QNC_{pwwst} + \sum_{(w,v) \in R} QEL_{pwwst} \\
& = INV_{pvst} + \sum_{(v,w) \in Lf3} Q_{pwwst} + \sum_{(v,w) \in Lr2} QNC_{pwwst} + \sum_{(v,w) \in Lr2} QEL_{pwwst} \quad (8) \\
& \forall p \in G, v \in V_r, (s,t) \in Sset \mid t = 1
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& INV_{pvs2t-1} + \sum_{(w,v) \in F} Q_{pwwst} + \sum_{(w,v) \in R} QNC_{pwwst} + \sum_{(w,v) \in R} QEL_{pwwst} \\
& = INV_{pvst} + \sum_{(v,w) \in Lf3} Q_{pwwst} + \sum_{(v,w) \in Lr2} QNC_{pwwst} + \sum_{(v,w) \in Lr2} QEL_{pwwst} \quad (9) \\
& \forall p \in G, v \in V_r, (s,t) \in Sset \mid t > 1
\end{aligned}$$

4.4.2 Restrições de Vendas e Demanda

A equação (10), mesma utilizada por Cardoso *et al.* (2013), representa as vendas em cada mercado consumidor v , para cada produto final p , em cada nó s do cenário de árvore e para cada período de tempo t (S_{pvst}) que são determinadas pela quantidade de produtos p que são enviados para os clientes através dos pontos varejistas (Q_{pwwst}).

$$S_{pvst} = \sum_{(w,v) \in F} Q_{pwwst} \quad \forall p \in G, v \in V_m, (s,t) \in Sset \quad (10)$$

A equação (11), mesma utilizada por Cardoso *et al.* (2013), define o Nível de Atendimento da Demanda para cada mercado consumidor e para cada período de

tempo t forçando que o total de vendas de cada cliente (S_{pvst}) deve ser maior que uma taxa (tg) mínima e máxima ou igual à demanda real do período (D_{pvst}).

$$D_{pvst} \times tg \leq S_{pvst} \leq D_{pvst} \quad \forall p \in G, v \in V_m, (s, t) \in Sset \quad (11)$$

As expressões (12a)-(12c) são utilizadas para calcular o valor da Demanda de cada produto p para cada mercado consumidor v em cada nó s da árvore de cenários em cada período de tempo t . Estas equações foram adaptadas de Cardoso *et al.* (2013) porque a cadeia de suprimentos do estudo de caso trabalha com uma projeção de aumento fixo da demanda (df) definido pela gestão estratégica da empresa.

$$D_{pvst} = dm_{pvt} \quad \forall p \in G, v \in V_m, (s, t) \in Sset | t = 1 \quad (12a)$$

$$D_{pvst} = df \times D_{p,v,s,t-1} (1 + vd_s) \quad \forall p \in G, v \in V_m, (s, t) \in Sset | t = 2 \quad (12b)$$

$$D_{pvst} = df \times D_{p,v,s,t-1} (1 + vd_s) \quad \forall p \in G, v \in V_m, (s, t) \in Sset | t = 3 \quad (12c)$$

4.4.3 Restrições dos Processos de Tecnologia

A cadeia de suprimentos é composta por tecnologias de produção $i1$ e $i2$ instaladas em cada fábrica $f1$ e $f2$, respectivamente, e por tecnologias de descarte, desmontagem e retrabalho $i3$ e $i4$, também instaladas nas fábricas $f1$ e $f2$.

A inequação (13), mesma utilizada por Cardoso *et al.* (2013), limita a capacidade do fluxo entre os processos i nas entidades v (Out_{ipvst}) para ser menor que a capacidade existente do processo de tecnologia (C_{ivt}^p) e maior que uma porcentagem mínima de utilização (pt_{iv}).

$$pt_{iv} \times C_{ivt}^p \leq \sum_{(i,p) \in O} Out_{ipvst} \leq C_{ivt}^p \quad \forall i \in H, v \in V_h, (s, t) \in Sset \quad (13)$$

A inequação (14), mesma utilizada por Cardoso *et al.* (2013), garante que a quantidade de matéria-prima necessária para produção do processo de tecnologia i (In_{ipvst}) é menor que a Capacidade atual de Recebimento de Matérias-primas C_{ivt}^p .

$$\sum_{(i,p) \in I} In_{ipvst} \leq C_{ivt}^p \quad \forall i \in H, v \in V_n, (s,t) \in Sset \quad (14)$$

As equações (15) e (16), mesmas utilizada em Cardoso *et al.* (2013), calculam a Capacidade Produtiva em cada Processo i na entidade v (C_{ivt}^p) através do somatório da capacidade inicial (im_{iv} par ao primeiro período de tempo e C_{pivt-1} para o restante dos períodos) e a expansão de capacidade produtiva no período t (CEP_{ivt}). Esta equação é também utilizada para a verificação da necessidade de instalação de novas entidades com novos processos de tecnologia, onde a capacidade inicial é configurada a zero. Se a o valor da variável C_{ivt}^p aumentar para o número máximo, significa que um novo processo de tecnologia deve ser instalado. Para o estudo de caso, a expansão de capacidade de produção das tecnologias não se faz necessária uma vez que a capacidade inicial das fábricas é muito alta.

$$C_{ivt}^p = im_{iv} + CEP_{ivt}^p \quad \forall i \in H, v \in V_h | t = 1 \quad (15)$$

$$C_{ivt}^p = C_{ivt-1}^p + CEP_{ivt}^p \quad \forall i \in H, v \in V_h | t > 1 \quad (16)$$

A inequação (17), mesma utilizada por Cardoso *et al.* (2013), define Limites superior e inferior de Expansão de Capacidade dos Processos i em cada entidade v em cada período de tempo t (CEP_{ivt}).

$$lcP_{iv} \times XP_{ivt} \leq CEP_{ivt} \leq upcP_{iv} \times XP_{ivt} \quad \forall t, i \in H, v \in V_h \quad (17)$$

A inequação (18), mesma utilizada em Cardoso *et al.* (2013), indica o número total da Expansão de Capacidade dos Processos em unidades que pode ocorrer no

processo i na entidade v ao longo de todo horizonte de tempo, o qual deve ser menor ou igual que o limite específico ncP_{iv} .

$$\sum_t XP_{ivt} \leq ncP_{iv} \quad \forall i \in H, v \in V_h \quad (18)$$

4.4.4 Restrições de Armazenamento

As equações (19) e (20), mesmas utilizadas em Cardoso *et al.* (2013), calculam a Capacidade de Armazenagem (C_{vt}^s) de cada entidade de armazenamento v através do somatório da capacidade inicial (is_v) para o primeiro período de tempo e C_{vt-1}^s (para os demais períodos) e a expansão de capacidade realizada no período de tempo t (CE_{vt}^s). Esta equação é também utilizada para a verificação da necessidade de instalação de novas entidades de armazenamento, onde a capacidade inicial é configurada a zero. Se a o valor da variável CE_{vt}^s aumentar para o número positivo, significa que uma nova entidade para armazenamento deve ser construída. Para o estudo de caso, estas a expansão de capacidade de armazenagem se faz necessária uma vez que a capacidade inicial dos armazéns e pontos varejistas é muito alta C_{vt}^s .

$$C_{vt}^s = is_v + CE_{vt}^s \quad \forall v \in V_z | t=1 \quad (19)$$

$$C_{vt}^s = C_{vt-1}^s + CE_{vt}^s \quad \forall v \in V_z | t>1 \quad (20)$$

A inequação (21), mesma utilizada em Cardoso *et al.* (2013), aplica limites superior e inferior para a Expansão de Capacidade de Armazenamento das entidades (CE_{vt}^s) em cada período de tempo t .

$$lcS_v \times X_{vt}^s \leq CE_{vt}^s \leq upcS_v \times X_{vt}^s \quad \forall t, v \in V_z \quad (21)$$

A inequação (22), mesma utilizada em Cardoso *et al.* (2013), limita o número total da Expansão de Capacidade de Armazenamento em unidades que podem ocorrer

para cada entidade de armazenamento ao longo de todo horizonte de tempo, o qual deve ser menor ou igual que o limite específico ncS_v .

$$\sum_t X_{vt}^s \leq ncS_v \quad \forall v \in V_Z \quad (22)$$

A inequação (23), mesma utilizada por Cardoso *et al.* (2013), garante que o estoque total da entidade v no período de tempo t no nó s do cenário de árvore (INV_{pvst}) tem que ser menor que a capacidade de Armazenamento disponível em cada período de tempo (C_{vt}^s).

$$\sum_{p \in G} INV_{pvst} \leq C_{vt}^s \quad \forall v \in V_Z, (s, t) \in Sset \quad (23)$$

As inequações (24) e (25) são as mesmas utilizadas em Cardoso *et al.* (2013).

A inequação (24) define que a Capacidade de armazenagem de produtos em uma entidade v (C_{vt}^s) é menor ou igual a duas vezes o nível de estoque médio dado na entidade v para o nó s do cenário de árvore e para o período de tempo t (IL_{vst}).

$$2 \times IL_{vst} \leq C_{vt}^s \quad \forall v \in V_Z, (s, t) \in Sset \quad (24)$$

A equação (25) calcula o Nível do Estoque Médio armazenado em cada entidade de armazenagem v em cada nó s do cenário de árvore em cada período de tempo t o qual é definido por IL_{vst} . Este parâmetro é calculado a partir dos produtos que são enviados no fluxo direto desta entidade para todas as outras entidades, dividido pelo giro de estoque (tor_v).

$$IL_{vst} = \frac{\sum_{(v,w) \in F} \sum_{p \in G} Q_{pvwst}}{tor_v} \quad \forall v \in V_Z, (s, t) \in Sset \quad (25)$$

4.4.5 Restrições de Fluxo Reverso

As equações (26) e (27) foram adaptadas de Cardoso *et al.* (2013), os parâmetros nc e el são fornecidos pela área de gestão dos estoques da empresa enquanto que no trabalho dos autores os parâmetros são deduzidos de 1 para alcançar o valor de itens não conformes e em final de vida útil.

A equação (26) define a quantidade de produtos não conformes que são retornados de cada cliente para os pontos varejistas é igual à quantidade do fluxo direto de produtos enviados para os mercados consumidores, multiplicada pela porcentagem de produtos não conformes existentes (nc).

$$\sum_{w \in Vr} QNC_{pwwst} = \sum_{(w,v) \in F} (Q_{pwwst} \times nc) \quad (26)$$

$\forall p \in Pf, v \in V_m, (s, t) \in Sset$

A equação (27) define a quantidade de produtos em final de vida útil que são enviados de cada cliente para os pontos varejistas. Esta quantidade deve ser igual à quantidade do fluxo direto de produtos enviados para os mercados consumidores, multiplicada pela porcentagem de produtos em final de vida útil existentes (el).

$$\sum_{w \in Vr} QEL_{pwwst} = \sum_{(w,v) \in F} (Q_{pwwst} \times el) \quad \forall p \in Pf, v \in V_m, (s, t) \in Sset \quad (27)$$

As equações (28) à (33) foram adaptadas de Cardoso *et al.* (2013), o trabalho dos autores considera o tempo de vida útil dos produtos para retrabalho e descarte enquanto que a cadeia do estudo de caso estima com base em dados históricos os parâmetros nc e el de produtos que são devolvidos pelos mercados consumidores para as fábricas.

definem a quantidade de produtos não conformes (QNC) e em final de vida útil (QEL) enviados no fluxo reverso pelos pontos varejistas para os armazéns. Esta quantidade é definida pelos parâmetros nc e el .

$$\sum_{w \in Vw} QNC_{pvwst} = \sum_{(w,v) \in Lf3} (Q_{pvwst} \times nc) \quad \forall p \in Pf, v \in Vr, (s,t) \in Sset \quad (28)$$

$$\sum_{w \in Vw} QEL_{pvwst} = \sum_{(w,v) \in Lf3} (Q_{pvwst} \times el) \quad \forall p \in Pf, v \in Vr, (s,t) \in Sset \quad (29)$$

As equações (30) e (31) definem a quantidade de produtos não conformes (QNC) e em final de vida útil (QEL) enviados no fluxo reverso pelos armazéns para os centros de retrabalho. Esta quantidade é definida pelos parâmetros nc e el .

$$\sum_{w \in Vd} QNC_{pvwst} = \sum_{(w,v) \in Lf3} (Q_{pvwst} \times nc) \quad \forall p \in Pf, v \in Vw, (s,t) \in Sset \quad (30)$$

$$\sum_{w \in Vd} QEL_{pvwst} = \sum_{(w,v) \in Lf3} (Q_{pvwst} \times el) \quad \forall p \in Pf, v \in Vw, (s,t) \in Sset \quad (31)$$

As equações (32) e (33) definem a quantidade de produtos não conformes (QNC) e em final de vida útil (QEL) enviados no fluxo reverso pelos centros de retrabalho para descarte. Esta quantidade é definida pelos parâmetros dNc e dEl .

$$\sum_{w \in Vn} QNC_{pvwst} = dNc \times \sum_{(w,v) \in Lf3} (Q_{pvwst} \times nc) \quad \forall p \in Pf, v \in Vd, (s,t) \in Sset \quad (32)$$

$$\sum_{w \in Vn} QEL_{pvwst} = dEl \times \sum_{(w,v) \in Lf3} (Q_{pvwst} \times el) \quad \forall p \in Pf, v \in Vd, (s,t) \in Sset \quad (33)$$

4.4.6 Restrições de Variáveis Binárias

As inequações (34) à (37) são as mesmas utilizadas por Cardoso et al.(2013).

As inequações (34), (35) e (36) influenciam as atribuições das variáveis binárias que representam os fluxos de transporte em cada sentido, direto e reverso, entre dois nós da cadeia de suprimentos. A primeira inequação dentre as três

elencadas é utilizada para definir o Fluxo de transporte normal direto, já a segunda inequação define o Fluxo Reverso de Produtos Não Conformes; a última inequação define o Fluxo Reverso de Produtos em Final de Vida Útil. Um valor zero para estas variáveis impede o fluxo de materiais entre os nós correspondentes. Por outro lado, o valor um permite o fluxo de materiais com limites superior e inferior.

$$low_{vwt} \times Y_{vwt} \leq \sum_{p \in G} Q_{pvwst} \leq up_{vwt} \times Y_{vwt} \quad \forall (v, w) \in F, (s, t) \in Sset \quad (34)$$

$$low_{vwt} \times YNC_{vwt} \leq \sum_{p \in G} QNC_{pvwst} \leq up_{vwt} \times YNC_{vwt} \quad (35)$$

$$\forall (v, w) \in R, (s, t) \in Sset$$

$$low_{vwt} \times YEL_{vwt} \leq \sum_{p \in G} QEL_{pvwst} \leq up_{vwt} \times YEL_{vwt} \quad (36)$$

$$\forall (v, w) \in R, (s, t) \in Sset$$

4.4.7 Restrição de Capital de Investimento

A inequação (37) define o Limite de Capital de Investimento (*FCI*) a partir do parâmetro *FCIup*.

$$FCI \leq FCIup \quad (37)$$

Desta forma, por meio das expressões (1) a (37) anteriormente explicadas define-se um modelo em Programação Linear Inteira Mista utilizado como base para a resolução do problema em análise.

A subseção 4.5 a seguir elenca expressões utilizadas para avaliar, em um passo seguinte à resolução computacional do modelo PLIM, questões tributárias.

4.5 REGRAS TRIBUTÁRIAS

4.5.1 Regras tributárias da fábrica da Bahia

A Tabela 9 apresenta o nome das variáveis utilizadas nas equações das regras tributárias.

Tabela 9: Variáveis das regras tributárias

Variável Contínua	Descrição
$ICMS_{f1st}^+$	Crédito de ICMS adquirido na compra de insumos de fornecedores pela fábrica f1, no nó s e no período t (\$)
$ICMS_{f2st}^+$	Crédito de ICMS adquirido na compra de insumos de fornecedores pela fábrica f2, no nó s e no período t (\$)
$ICMS_{f1st}^-$	Débito de ICMS adquirido na venda do produto acabado pela fábrica f1, no nó s e no período t (\$)
$ICMS_{f2st}^-$	Débito de ICMS adquirido na venda do produto acabado pela fábrica f2, no nó s e no período t (\$)
$SALDO_{f1st}$	Saldo atual de ICMS na fábrica f1, no nó s e no período t (\$)
$SALDO_{f2st}$	Saldo atual de ICMS na fábrica f2, no nó s e no período t (\$)
$PAGO_{f2st}$	ICMS que deve ser pago pela fábrica f2, no nó s e período t (\$)
$DESENVOLVE_{f2st}$	ICMS que pode ser pago 72 meses após emissão da Nota Fiscal de venda de produtos pela fábrica f2, no nó s e no período t (\$)
$Custo_{op}$	Custo de oportunidade no período t (\$)
ip	Percentual do ICMS que deve ser pago no ato da emissão da nota fiscal (%)
id	Percentual do ICMS que pode ser pago 72 meses após emissão da nota fiscal (%)

As equações (38)-(42) representam a dinâmica de funcionamento da malha tributária vigente na fábrica da Bahia ($f2$).

A equação (38) define o crédito de $ICMS_{f2}^+$ na fábrica da Bahia ($f2$) adquirido da compra de insumos de fornecedores.

$$ICMS_{f2st}^+ = \sum_{(v,w) \in Lf1} Q_{pvwst} \times qr_{pp2} \times ICMS_{f2} \quad (38)$$

$\forall p \in Pf, p2 \in Pr, v=f2, (s,t) \in Sset$

A equação (39) define o débito de $ICMS_{f2}^-$ adquirido na venda de produto acabado.

$$ICMS_{f2st}^- = \sum_{(v,w) \in Lf1} Q_{pvwst} \times Oc_{ivpt} \times ICMS_{f2} \quad (39)$$

$\forall p \in Pf, p2 \in Pr, v=f2, (s,t) \in Sset$

A equação (40) define o $SALDO_{f2}$ de ICMS atual na fábrica da Bahia ($f2$).

$$SALDO_{f2st} = ICMS_{f2}^+ + ICMS_{f2}^- \quad \forall (s,t) \in Sset \quad (40)$$

A equação (41) define o ICMS que deve ser $PAGO_{f2}$ no ato da Emissão da Nota Fiscal.

$$PAGO_{f2st} = |SALDO_{f2}| \times ip \quad \forall (s,t) \in Sset \quad (41)$$

A Equação (42) define o ICMS que pode ser pago 72 meses após emissão da Nota Fiscal, conforme benefício oferecido pelo Programa Desenvolve Bahia ($DESENVOLVE_{f2st}$) do Governo Federal Brasileiro.

$$DESENVOLVE_{f2st} = |SALDO_{f2}| \times id \quad \forall (s,t) \in Sset \quad (42)$$

4.5.2 Regras tributárias da fábrica do Paraná

As equações (43)-(45) representam a dinâmica de funcionamento da malha tributária vigente na fábrica do Paraná ($f1$).

A equação (43) define o crédito de $ICMS_{f1}^+$ adquirido na compra de insumo de fornecedores.

$$ICMS_{f1st}^+ = \sum_{(v,w) \in Lf1} Q_{pvwst} \times qr_{pp2} \times ICMS_{f1} \quad (43)$$

$\forall p \in Pf, p2 \in Pr, v = f1, (s, t) \in Sset$

A equação (44) define o débito de $ICMS_{f1}^-$ adquirido na venda de produto acabado.

$$ICMS_{f1st}^- = \sum_{(v,w) \in Lf1} Q_{pvwst} \times Oc_{ivpt} \times ICMS_{f1} \quad (44)$$

$\forall p \in Pf, p2 \in Pr, v = f1, (s, t) \in Sset$

A equação (45) define o $SALDO_{f1}$ de ICMS atual na fábrica do Paraná ($f1$).

$$SALDO_{f1st} = ICMS_{f1}^+ + ICMS_{f1}^- \quad \forall (s, t) \in Sset \quad (45)$$

A equação (46) define o cálculo do $Custo_{op}$ de oportunidade a partir da multiplicação do valor não pago de ICMS ($DESENVOLVE_{f2}$) no período de tempo t pela taxa CDI_{mensal}

$$Custo_{op} = DESENVOLVE_{f2} \times CDI_{mensal} \quad (46)$$

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo apresentou-se a formulação matemática do modelo da cadeia de suprimentos. Foram descritas as premissas e simplificações adotadas, apresentou-se a nomenclatura de índices, conjuntos e variáveis, bem como a função objetivo e as restrições que definem o modelo.

Como comentado anteriormente, para as análises dos estudos realizados são utilizados dois modelos adaptados de Cardoso *et al.* (2013) e quatro diferentes estudos de caso são conduzidos, conforme detalhado a seguir no Capítulo 5.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo apresentam-se as soluções da cadeia de suprimentos para as diferentes versões do modelo de otimização do Valor Presente Líquido apresentados no Capítulo 4. Para fins de comparação dos resultados, utilizaram-se dados reais da empresa do ramo de cosméticos.

O modelo foi implementado utilizando o ambiente de modelagem e otimização IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* 12.5.1, em um computador com processador Intel Core i5 2.20 GHz e memória RAM instalada de 6Gb. As soluções do modelo foram obtidas em até 2 minutos de processamento.

5.1 CONFIGURAÇÕES

Dois modelos (casos A e B) e quatro configurações (casos A1, B1, B2 e B3) são considerados, conforme abaixo.

- Caso A, somente fluxo normal entre processos adjacentes, sem impostos, conforme ilustrado na Figura 5;

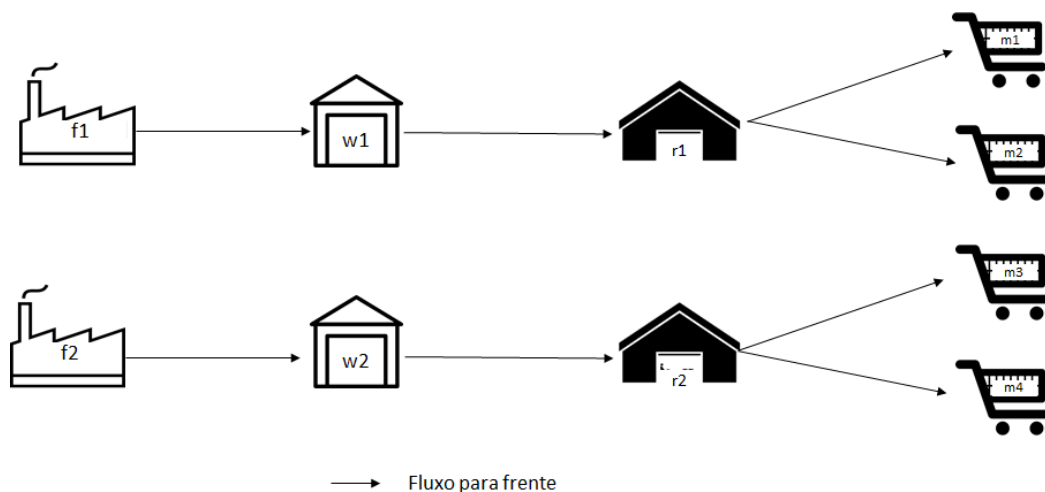


Figura 5: Caso A.

- Caso A1, similar ao caso A, mas agora a cadeia de suprimentos opera com as regras tributárias brasileiras a fim de captar os benefícios dos programas de incentivos fiscais disponibilizados pelo governo federal.
- Caso B, similar ao caso A, sem impostos, mas agora a cadeia de suprimentos é expandida para operar com atividades de logística reversa, conforme ilustrado na Figura 6. São considerados fluxos reversos entre os processos consecutivos onde a fábrica pode realizar atividades de retrabalho e descarte de produtos não conformes ou em final de vida útil;

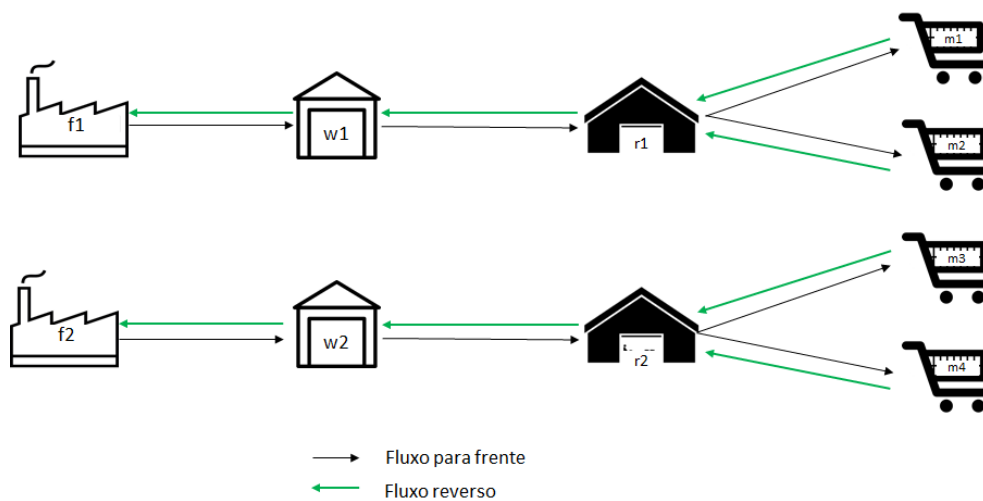


Figura 6: Caso B.

- Caso B1, similar ao caso B, mas agora a cadeia de suprimentos opera com as regras tributárias brasileiras a fim de captar os benefícios dos programas de incentivos fiscais disponibilizados pelo governo federal.
- Caso B2, similar ao caso B, mas agora a cadeia de suprimentos opera com incertezas na demanda;
- Caso B3, similar ao caso B, mas agora são realizadas alterações nos dados de entrada que poderiam limitar as decisões do modelo, a fim de verificar as decisões de produção e estoques e o impacto nos resultados operacionais. Ilustra-se o Caso B3 por meio da Figura 7. Para todos os casos foi considerado o objetivo de maximizar o VPL.

Caso B3, com logística reversa e fluxos flexíveis

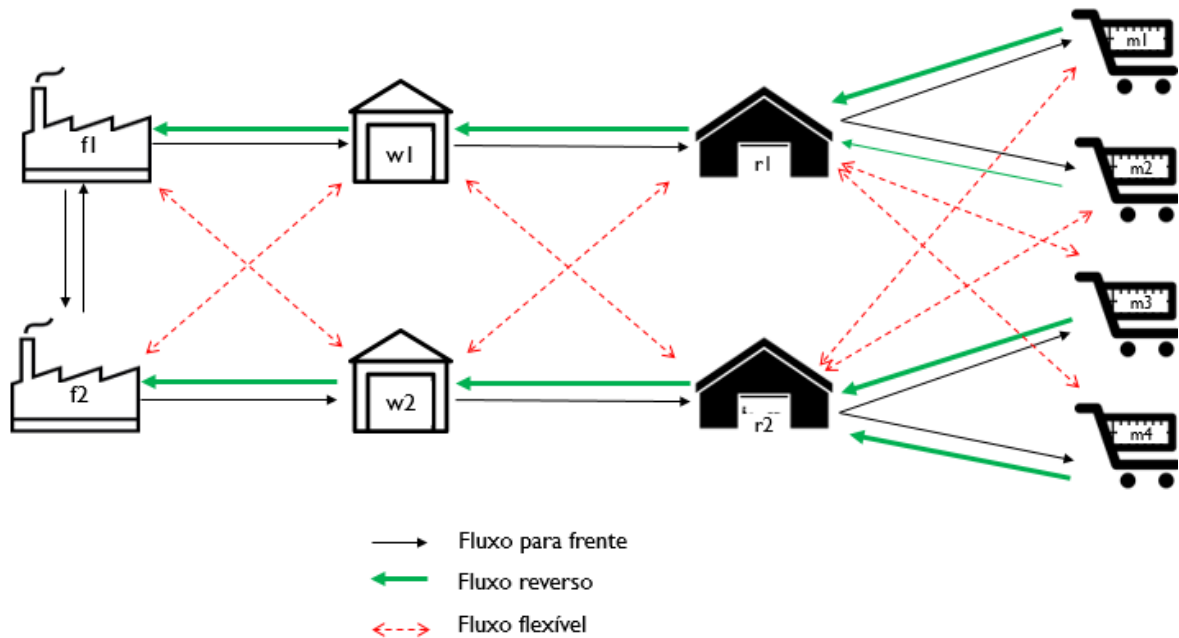


Figura 7: Caso B3.

5.2 VERIFICAÇÃO DO MODELO

Para verificação dos resultados do modelo foram realizados levantamentos dos dados históricos da empresa para cada item listado abaixo:

- (i) Custos de Distribuição: referem-se aos custos de transporte necessários para a movimentação dos produtos entre os nós da cadeia de suprimentos;
- (ii) Custos de Produção: relacionados com mão de obra, máquina, energia elétrica e outros recursos necessários para produção do produto final p5;
- (iii) Custos de Compras: representa os custos totais com compras de insumos e matérias-primas necessários para compor a lista técnica dos produtos acabados;
- (iv) Vendas: refere-se ao valor financeiro de receita bruta das vendas do produto final p5 para os mercados consumidores;

(v) Valor Presente Líquido: é o lucro líquido após as deduções de todos os custos da cadeia de suprimentos.

Os casos A e B foram configurados com cenários realistas de demanda $R_t(1)$, $R(1)$ e $RR(1)$, ou seja, foi determinado 100% de probabilidade (pb) de ocorrência dos cenários realistas de demanda para os três períodos de tempo. As probabilidades (pb) dos demais nós da árvore de cenários estão configuradas com valor zero porque os Casos A e B operam sem incertezas na demanda. Os modelos estão configurados para apresentar aumento de 30% da demanda, independente do cenário ($vd_s=0$).

A verificação dos resultados do modelo dos casos determinísticos A e B está concentrada no primeiro período de tempo ($t=1$), ou seja, não há aumento de demanda no nó raiz R_t . O valor de demanda para o nó raiz R_t considerado foi de 5.000.000 unidades de $p5$.

Nas Figuras 8 e 9 são apresentados os resultados do modelo para os casos determinísticos A e B, para o primeiro período de tempo ($t=1$) bem como os resultados do caso real, que opera com logística reversa, referentes ao ano de 2015.

O caso A refere-se ao modelo da cadeia que opera sem logística reversa e o Caso B opera com logística reversa. A seguir é descrito o resultado para os itens: custos de distribuição, produção e compras, também os resultados operacionais de vendas e Valor Presente Líquido do período.

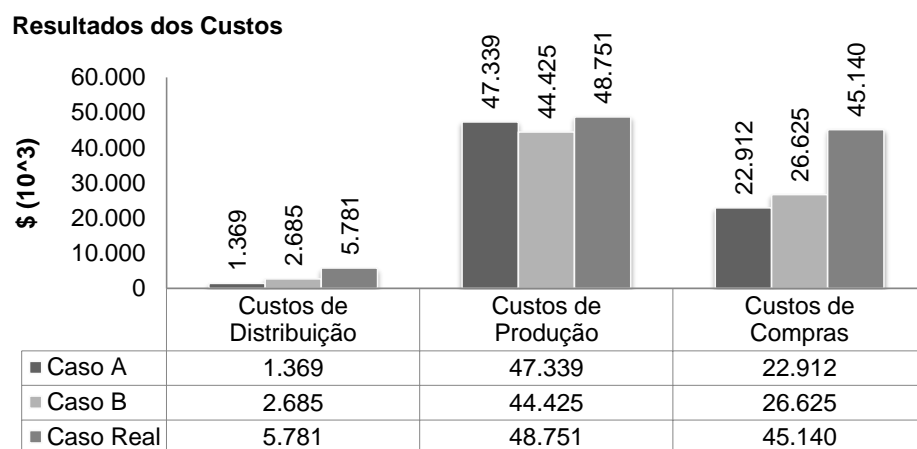


Figura 8: Resultados dos Custos dos Casos A, B e Real para $t=1$.

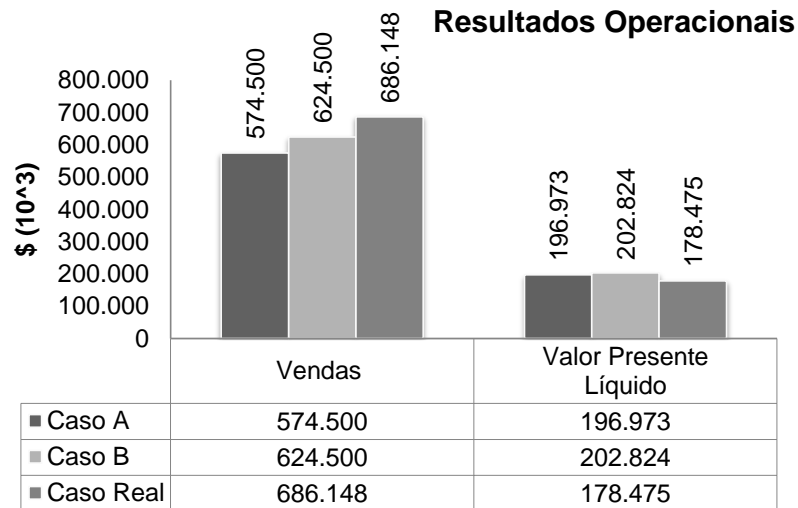


Figura 9: Resultados Operacionais dos Casos A, B e Real para $t=1$.

1-Custos de Distribuição

Os custos de distribuição para o Caso Real foram de 5,781 milhões de unidades monetárias no exercício de 2015, enquanto que os custos de distribuição do modelo referente ao caso B, com logística reversa, para o primeiro período de tempo ($t=1$) foi de aproximadamente 2,685 milhões de unidades monetárias, ou seja, os custos de distribuição do modelo para o caso B representam 45,73% do custo do caso real. Esta diferença é justificada porque no projeto do modelo da cadeia de suprimentos dos casos A e B foram considerados somente os quatro principais mercados consumidores do caso real m1, m2, m3 e m4 que possuem maior representatividade em volume de fluxo de transporte na cadeia. Estes mercados representam alguns estados das regiões Sul (Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná), Sudeste (São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais), Norte (Amazonas e Pará) e Nordeste (Bahia e Ceará). Para facilitar a visualização dos estados na Figura 10 é apresentado o mapa do Brasil conforme IBGE.



Figura 10: Mapa dos Estados Brasileiros.
Fonte: IBGE

Já o custo de distribuição do caso A, sem logística reversa, foi de 1,369 milhão de unidades monetárias e representa 23,68% dos custos do caso real. Esta diferença é justificada pela ausência dos custos de transporte com fluxos reversos no caso A para atividades de recuperação de produtos finais p5 não conformes (QNC) e em final de vida útil (QEL). Da mesma forma, o modelo do caso A considerou somente os quatro principais mercados consumidores do caso real.

Esta diferença de 50,98% nos custos de distribuição entre os casos A e B se dá devido ao custos de transporte do somatório de 425 mil unidades de produtos QNC e QEL que retornam dos mercados consumidores para recuperação. Pelo volume expressivo de peças que retornam dos mercados consumidores para retrabalho ou descarte, o custo logístico torna-se um valor representativo, uma vez que o modelo não determina a quantidade de peças por veículo e não otimiza rotas de transporte.

No projeto do modelo da cadeia de suprimentos os custos dos fluxos de transporte (lk) do sentido direto e reverso apresentam valores iguais, conforme características do caso real. Desta forma, o modelo não foi forçado para priorizar o fluxo reverso.

2-Custos de Produção

Os resultados dos custos de produção do modelo do caso B, com logística reversa, foram de 44,425 milhões de unidades monetárias, enquanto que os resultados do caso real para o mesmo período foram de 48,751 milhões de unidades monetárias. A diferença entre os resultados de 4.326 milhões de unidades monetárias representa uma redução de aproximadamente 8% em relação aos dados do caso real, ou seja, verificou-se um fator de desvio de 8% dos dados obtidos do modelo do caso B, com logística reversa, dos resultados do caso real.

Os custos de produção estão relacionados à disponibilidade de mão-de-obra e recursos das fábricas para produção dos produtos acabados p5. O caso B opera com atividades de logística reversa que recuperam produtos não conformes (QNC) e em final de vida útil (QEL) disponibilizando-os novamente para os mercados consumidores evitando custos de produção com novos produtos.

Ao invés da fábrica realizar uma nova produção para reposição dos produtos reprovados nos clientes, estes produtos retornam para os centros de retrabalho, onde é realizado o condicionamento para retornarem novamente ao cliente. Logo, a atividade de recuperação de produtos reprovados gera redução dos custos de produção, este fato resulta no aumento de 3% do VPL quando comparam-se os resultados dos casos determinísticos A e B.

No período de tempo $t=1$, o modelo do caso B, com logística reversa, apresentou 175.000 produtos não conformes (QNC) e 250.000 produtos em final de vida útil (QEL). Estes produtos foram retornados para a fábrica, um somatório de 425.000 unidades de produtos, ou seja, aproximadamente 8,5% do volume total entregue para os clientes de cinco milhões de unidades.

O modelo está configurado para descartar 11% da quantidade de produtos QNC e 11% da quantidade de QEL que chega na fábrica para retrabalho. Isto ocorre devido às más condições que os produtos reprovados chegam para o retrabalho. Este valor vem do percentual de descarte considerado no orçamento da empresa do caso real. Desta forma, 46.750 unidades são descartadas, ou seja, somente 378.250 unidades de produtos são recuperados e disponibilizados novamente aos mercados consumidores. Estas quantidades estão disponíveis para consulta na Tabela 11 dos fluxos de transporte para $t=1,2$ e 3.

Já os resultados dos custos de produção do modelo do caso A, sem logística reversa, foram de 47,339 milhões de unidades monetárias, ou seja, 6,55% maior que os custos do caso B, com logística reversa, e 3% maior que os custos do caso real devido a não recuperação de produtos QNC e QEL e perdas com descartes no caso A.

No caso real a recuperação de produtos em final de vida útil (QEL) que estão no estoque dos mercados consumidores ficam sob a responsabilidade do próprio ponto de venda. Somente quando o produto reprovado está sob a administração da empresa que retorna para os centros de retrabalho para recuperação, ao contrário devem ser descartados pela loja. A rede de franquizados deve gerenciar seus estoques aplicando-se a metodologia FIFO (First In, First Out), a qual prioriza a saída de produtos que entraram primeiro no estoque, ou seja, o primeiro lote de produtos finais p5 que entrou no estoque deve ser o primeiro a sair no momento da venda para os clientes.

3-Custos de Compras

O resultado do custo de compras de insumos e matérias-primas do modelo do caso B, com logística reversa, que foi de 26,625 milhões de unidades monetárias, representa 58,9% do valor dos custos de compras do caso real de 45,140 milhões de unidades monetárias para o mesmo período. Enquanto que para o caso A o resultado foi de 22,912 milhões de unidades monetárias o que representa 50,75% dos custos do caso real.

Esta diferença é justificada pela representatividade dos custos de compras dos quatro insumos que compõe o produto acabado, considerados no projeto da cadeia dos casos A e B, em relação à lista técnica completa do produto acabado do caso real que é constituída por mais de trinta matérias-primas diferentes.

Os custos de compras dos quatro insumos que compõe uma unidade de produto final p5 considerados no modelo do caso A e B totalizam o valor de \$ 5,10. Já os custos de compras dos insumos da lista técnica completa que compõe uma unidade de produto acabado do caso real são de \$ 10,12. Logo, a representatividade dos custos de compras do modelo de caso A e B é de 50,39% dos custos de compras do caso real.

É possível verificar ainda que o resultado do caso A, sem logística reversa, é menor que o resultado de compras do caso B, pois no modelo do caso B, com logística reversa, com a reprovação de produtos a cadeia precisa realizar a recompra de

insumos para produção de novos produtos p5 para retornarem aos mercados consumidores.

4-Vendas

O resultado de vendas do modelo referente ao caso B, com logística reversa, foi de 624,5 milhões de unidades monetárias, enquanto que para o caso real foi de 686,148 milhões de unidades monetárias para o mesmo período de tempo. A representatividade do resultado de vendas do caso B em relação ao caso real é de 91,01%. Esta diferença é justificada pela variação no preço de venda do produto acabado p5 entre os dois casos.

Os resultados de vendas do caso real estão associados ao preço de venda do produto final p5 vigente no período de 2015, o qual sofre oscilações durante o ano devido aos ciclos de promoções e descontos. Já os resultados do modelo do caso B, com logística reversa, foi considerado um valor médio para o preço de venda do produto acabado p5 (fp) de \$ 124,90, enquanto que no caso real o valor médio de venda foi de \$ 135,90, ou seja, o preço unitário do caso B representa 91,9% do preço do caso real.

Já para o caso A o resultado de vendas para o primeiro período ($t=1$) foi de 574,5 milhões de unidades monetárias, representando 83,72% do resultado do caso real. Esta diferença aumenta devido ao custo de venda (fp) do produto p5 que é constituído pelas características dos custos da cadeia, ou seja, o caso da cadeia A que não opera com logística reversa o preço do produto final p5 vendido para a rede de franquias será menor que o custo do caso B que investe maior capital em custos operacionais de atividades de logística reversa.

O preço de venda de uma unidade de produto acabado utilizado no projeto do modelo do caso A foi de \$ 113,90, enquanto que no caso real o valor médio de venda utilizado foi de \$ 135,90, ou seja, o preço unitário do caso B representa 83,81% do preço do caso real.

O volume de demanda de 5 milhões de unidades configurada no modelo dos casos A e B representa o mesmo valor apurado na empresa para o exercício de 2015.

5-Valor Presente Líquido – VPL

A equação (1a) explica o cálculo do Valor Presente Líquido, o qual está relacionado com o Fluxo de Caixa do período que considera o valor de vendas, ou seja, o somatório de produtos p5 vendidos multiplicado pelo preço final de venda aos mercados consumidores. Deste valor são deduzidos além dos custos de distribuição, compras e produção outros custos, por exemplo, capital depreciado no período, taxas de impostos, custos dos processos de tecnologia de retrabalho e custos de armazenagem.

Por fim, o resultado do Valor Presente Líquido (VPL) do modelo para o caso B, com logística reversa, foi de 202,824 milhões de unidades monetárias, enquanto que o VPL do caso real para o mesmo período foi de 178,475 milhões de unidades monetárias. Desta forma, a diferença de 24,349 milhões de unidades monetárias representa um aumento de 13,64% no resultado do VPL do caso B comparando-se com o valor do caso real. Este aumento do VPL no modelo do caso B em relação ao caso real é justificado pela redução dos custos de produção devido a recuperação de produtos QNC e QEL e conforme mencionado anteriormente pela redução dos custos de distribuição pelo fato do modelo considerar os quatro mercados consumidores de maior representatividade de fluxo de materiais do caso real e redução dos custos de compras com insumos e matéria-prima.

Para o caso A, o resultado é de 196,973 milhões de unidades monetárias, uma diferença para o caso real de 10,36%. Esta redução do resultado do caso A comparando com o resultado do caso real está diretamente relacionada à redução do preço de venda do produto final p5 aos clientes, além das diferenças de custos de distribuição, produção e compras entre as duas cadeias de suprimentos já mencionadas.

Os resultados computacionais dos modelos dos casos A e B são apresentados resumidamente na Tabela 10.

Tabela 10: Resultados Computacionais.

	Caso A	Caso B
Número Total de Variáveis	3.053	4.003
Variáveis Binárias	900	900
Restrições	3.219	4.733
Relative gap (%)	0	0
CPU (s)	9,98	13,48

O aumento na complexidade do modelo pela introdução de novos fluxos reversos de transporte entre as entidades levam para um aumento de variáveis e restrições. O *gap* para ambos os casos é zero. O tempo computacional sofreu um aumento com o crescimento da complexidade do problema, mas o modelo continua calculando o resultado em menos de 1 minuto.

5.3 FLUXOS DE TRANSPORTE E NÍVEIS DE ESTOQUE DOS CASOS A E B

A seguir, são apresentados os resultados dos fluxos de transporte e níveis de estoque médio do modelo para a cadeia de suprimentos dos casos A e B para o cenário 5 da árvore de cenários da Figura 3.

Primeiramente são analisados os fluxos de transporte de produtos bons (Q) no sentido direto da cadeia do caso A. Logo em seguida são apresentados os resultados dos fluxos direto de produtos bons (Q) e os fluxos reversos de produtos não conformes (QNC) e em final de vida útil (QEL) que retornam dos mercados consumidores e são recuperados para retornarem aos clientes do caso B.

Em seguida são avaliados os níveis de estoque de produtos em cada entidade de armazenagem do conjunto V_z (*warehouses* e *retailers*) para os períodos de tempo 1, 2 e 3 para os dois casos A e B.

Os dois modelos dos casos A e B foram configurados para cenários realistas de demanda com aumento de 30% por período, iniciando-se com uma demanda de 5 milhões de unidades monetárias em $t=1$, 6,5 milhões de unidades monetárias em $t=2$ e 8,45 milhões de unidades monetárias em $t=3$.

5.3.1 Fluxos de Transporte Caso A

É possível verificar que a demanda dos mercados consumidores é atendida 100% pelos pontos varejistas nos três períodos de tempo. O modelo decide produzir a quantidade de 2,5 milhões de unidades de produto acabado em cada fábrica f_1 e f_2 totalizando-se 5 milhões de unidades em $t=1$. No segundo período de tempo o modelo produz as 6,5 milhões de unidades dividindo-se o valor de produção igualmente entre as duas fábricas. No período $t=3$ a demanda também é atendida 100% com volume de

produção de 8,45 milhões de unidades novamente divididos igualmente entre as fábricas *f1* e *f2*.

Tabela 11: Fluxos de Transporte Caso A para *t=1*, *t=2* e *t=3*.

Pf	v	w	s	t	Q	Pf	v	w	s	t	Q	Pf	v	w	s	t	Q
P5	f1	w1	Rt	1	2.500.000	P5	f1	w1	R	2	3.250.000	P5	f1	w1	RR	3	4.225.000
P5	f2	w2	Rt	1	2.500.000	P5	f2	w2	R	2	3.250.000	P5	f2	w2	RR	3	4.225.000
P5	w1	r1	Rt	1	2.500.000	P5	w1	r1	R	2	3.250.000	P5	w1	r1	RR	3	4.225.000
P5	w2	r2	Rt	1	2.500.000	P5	w2	r2	R	2	3.250.000	P5	w2	r2	RR	3	4.225.000
P5	r1	m3	Rt	1	1.250.000	P5	r1	m3	R	2	1.625.000	P5	r1	m3	RR	3	2.112.500
P5	r1	m4	Rt	1	1.250.000	P5	r1	m4	R	2	1.625.000	P5	r1	m4	RR	3	2.112.500
P5	r2	m1	Rt	1	1.250.000	P5	r2	m1	R	2	1.625.000	P5	r2	m1	RR	3	2.112.500
P5	r2	m2	Rt	1	1.250.000	P5	r2	m2	R	2	1.625.000	P5	r2	m2	RR	3	2.112.500

Os fluxos de transporte do Caso A para os três períodos de tempo são ilustrados nas figuras 11, 12 e 13.

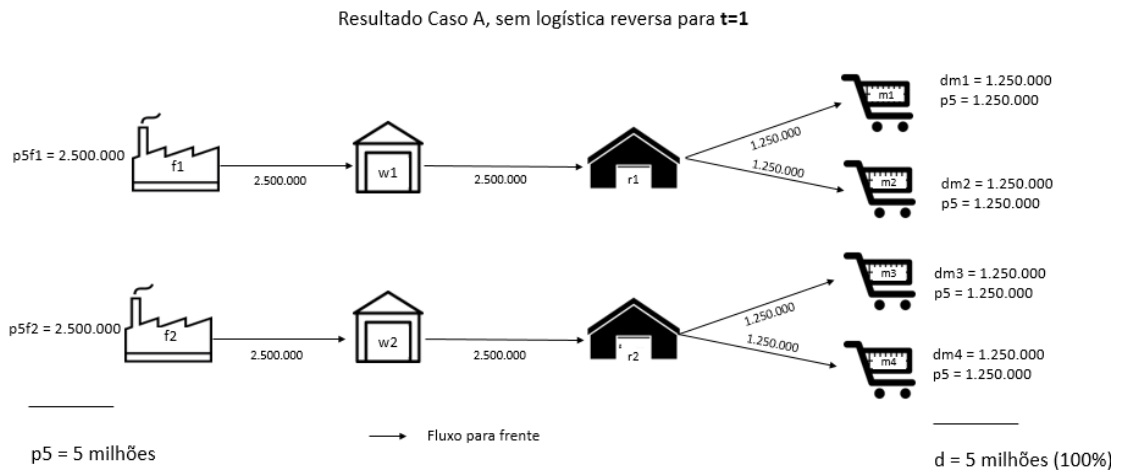


Figura 11: Fluxos de Transporte do Caso A em *t=1*.

Resultado Caso A, sem logística reversa para $t=2$

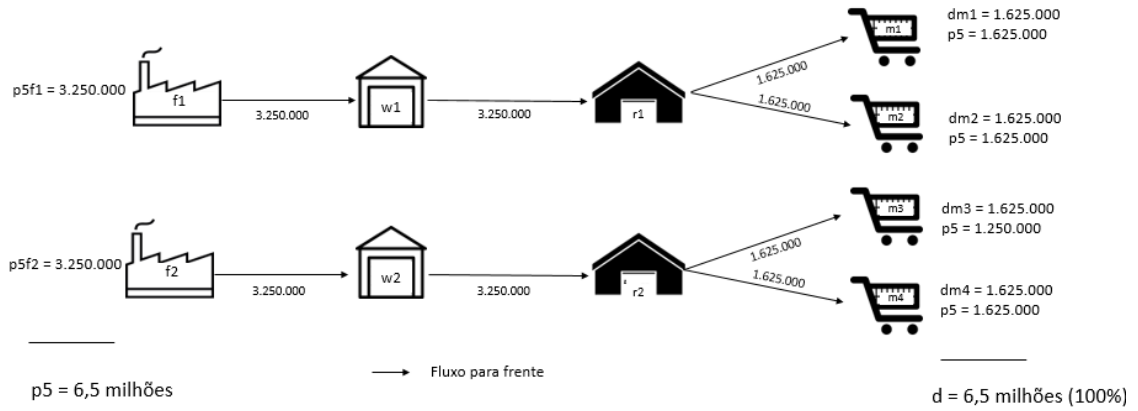


Figura 12: Fluxos de Transporte do Caso A em $t=2$.

Resultado Caso A, sem logística reversa para $t=3$

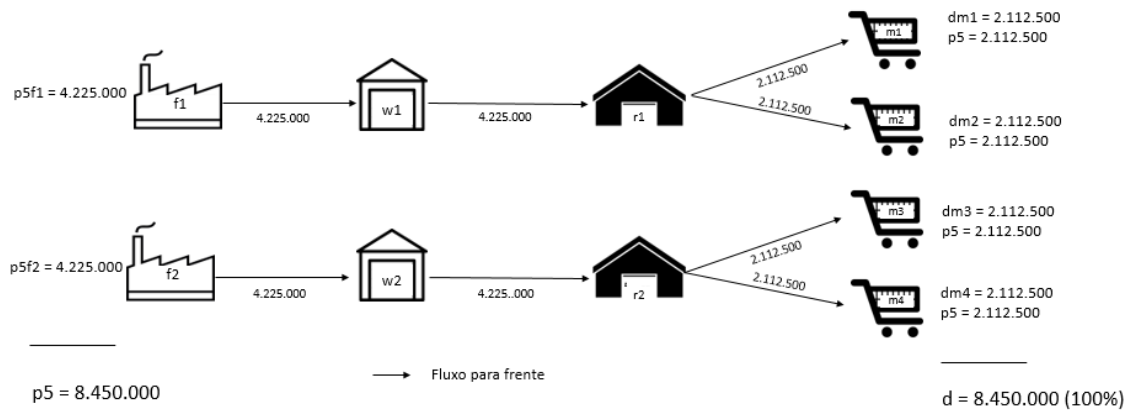


Figura 13: Fluxos de Transporte do Caso A em $t=3$.

5.3.2 Fluxos de Transporte Caso B

Para a interpretação dos resultados dos fluxos de transporte do caso B, os períodos de tempo t são divididos em três instantes ou momentos de tempo: (i) instante inicial; (ii) instante intermediário e (iii) instante final.

(i) Fluxos de Transporte no instante Inicial de $t=1$

A análise dos fluxos é iniciada pelo instante inicial do período de tempo $t=1$. Na Tabela 12 e Figura 14 é possível verificar que o modelo decide produzir na fábrica f1 uma quantidade de 2,5 milhões de unidades de produto acabado e na fábrica f2 a mesma quantidade de 2,5 milhões. O somatório da produção do produto final p5 nas fábricas f1 e f2 totalizam 5 milhões de unidades, igual ao valor da demanda do período.

Tabela 12: Fluxos de Transporte Caso B para $t=1$ (instante inicial).

Pf	v	w	s	t	Q
P5	f1	w1	Rt	1	2.500.000
P5	f2	w2	Rt	1	2.500.000
P5	w1	r1	Rt	1	2.500.000
P5	w2	r2	Rt	1	2.500.000
P5	r1	m3	Rt	1	1.250.000
P5	r1	m4	Rt	1	1.250.000
P5	r2	m1	Rt	1	1.250.000
P5	r2	m2	Rt	1	1.250.000

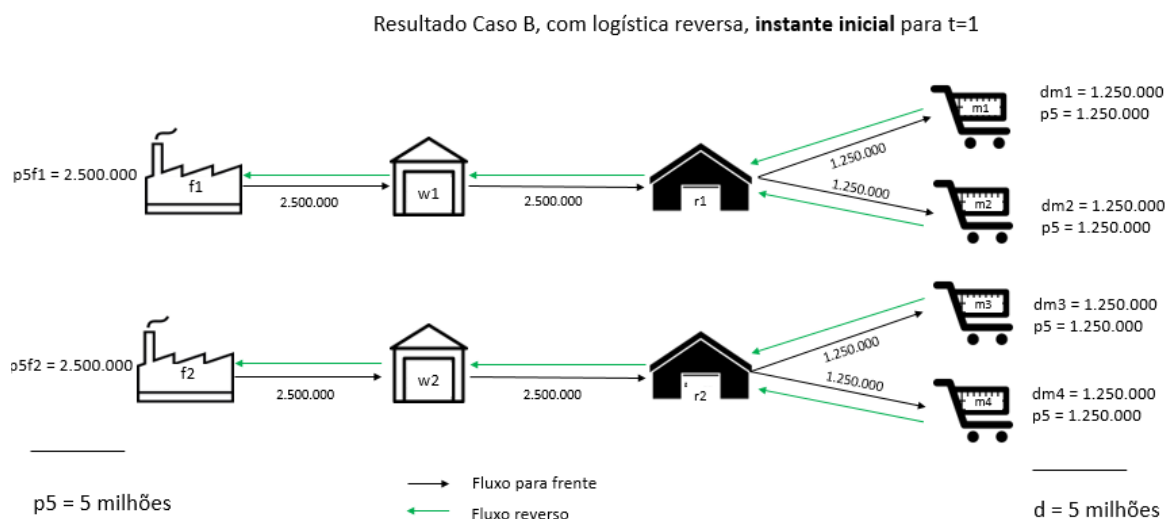


Figura 14: Fluxos de Transporte do Caso B em $t=1$ (instante inicial).

(ii) Fluxos de Transporte no instante intermediário de $t=1$

No instante intermediário de $t=1$ os produtos chegam aos mercados consumidores e são reprovados. Da quantidade de 5 milhões de unidades que as fábricas $f1$ e $f2$ disponibilizam para os clientes são reprovados 175 mil unidades de produtos não conformes (QNC) e 250 mil unidades de produtos em fina de vida útil (QEL), totalizando 425 mil unidades de produtos que retornam às fábricas para serem reconicionados, conforme ilustrados na Tabela 13 e Figura 15.

Quando os produtos QNC e QEL chegam nas fábricas passam por uma seleção para verificar as condições de qualidade necessárias para serem recuperados, caso os produtos reprovem na seleção de qualidade são descartados.

O modelo do caso B considera que 11% dos produtos QNC que chegam nas fábricas para serem recuperados são descartados, 19.250 unidades, e 11% dos produtos QEL, 27.500 unidades. Este valor de 11% é o mesmo utilizado pelo casos Real, a empresa considera estes valores no orçamento anual de descarte.

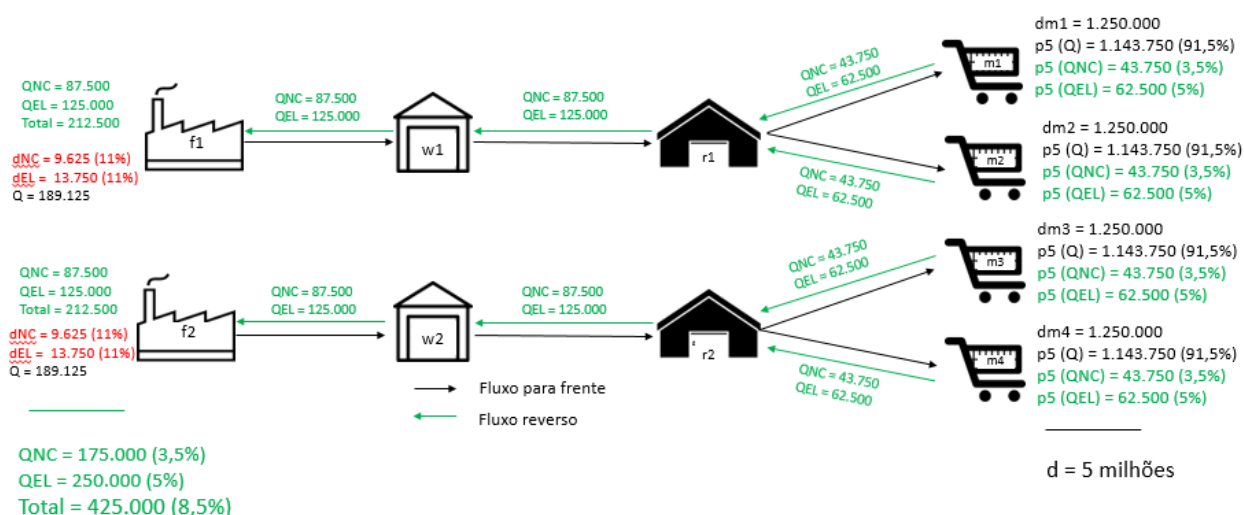
Após a inspeção, sobram 378.250 unidades aptos para serem reconicionados e retornarem para os mercados consumidores como produtos bons (Q).

Tabela 13: Fluxos de Transporte Caso B para $t=1$ (instante intermediário).

Pf	w	v	s	t	QNC
P5	m1	r1	Rt	1	43.750
P5	m2	r1	Rt	1	43.750
P5	m3	r2	Rt	1	43.750
P5	m4	r2	Rt	1	43.750
P5	r2	w2	Rt	1	87.500
P5	r1	w1	Rt	1	87.500
P5	w1	f1	Rt	1	87.500
P5	w2	f2	Rt	1	87.500

Pf	w	v	s	t	QEL
P5	m1	r1	Rt	1	62.500
P5	m2	r1	Rt	1	62.500
P5	m3	r2	Rt	1	62.500
P5	m4	r2	Rt	1	62.500
P5	r2	w2	Rt	1	125.000
P5	r1	w1	Rt	1	125.000
P5	w1	f1	Rt	1	125.000
P5	w2	f2	Rt	1	125.000

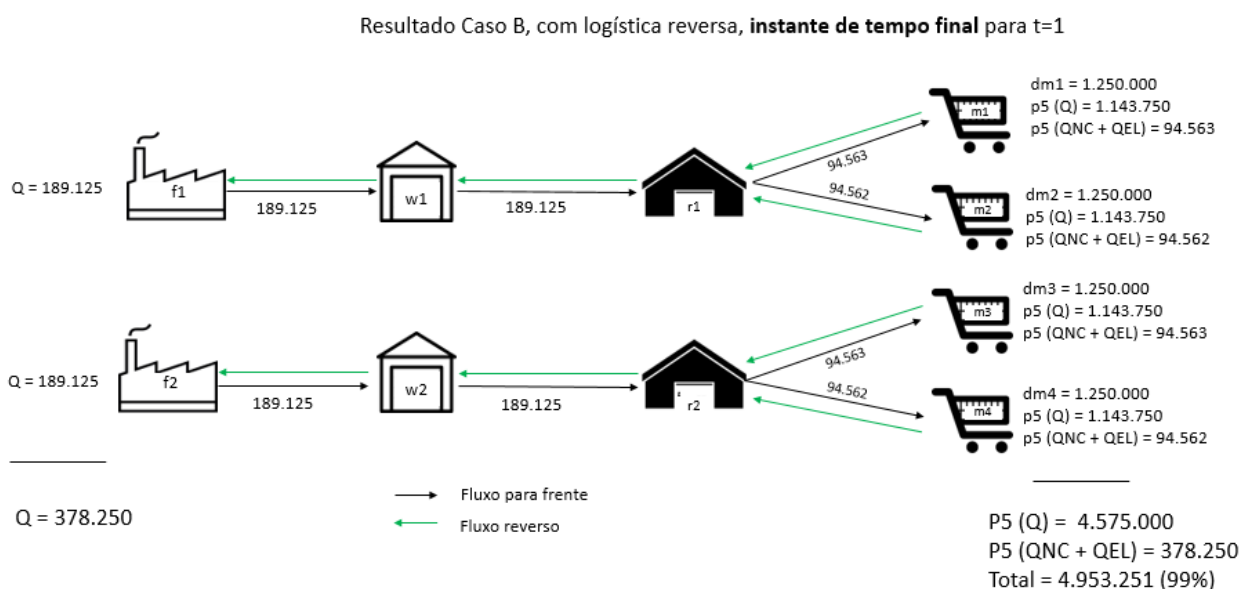
Pf	v	s	t	dEL	dNC
P5	f1	Rt	1	9.625	13.750
P5	f2	Rt	1	9.625	13.750

Resultado Caso B, com logística reversa, **instante intermediário** para $t=1$ Figura 15: Fluxos de Transporte do Caso B em $t=1$ (instante intermediário).(iii) Fluxos de Transporte no instante final de $t=1$

Conforme Tabela 14 e Figura 16 no instante final a quantidade de 378.250 unidades de produtos recuperados retornam para os mercados consumidores para complementar o atendimento da demanda de 5 milhões de unidades do período. Assim, o modelo recupera dos mercados consumidores 378.250 unidades de produtos que seriam descartados pelos clientes.

Tabela 14: Fluxos de Transporte Caso B para $t=1$ (instante final).

Pf	v	w	s	t	Q
P5	f1	w1	Rt	1	189.125
P5	f2	w2	Rt	1	189.125
P5	w1	r1	Rt	1	189.125
P5	w2	r2	Rt	1	189.125
P5	r1	m3	Rt	1	94.563
P5	r1	m4	Rt	1	94.562
P5	r2	m1	Rt	1	94.563
P5	r2	m2	Rt	1	94.562

Figura 16: Fluxos de Transporte do Caso B em $t=1$ (instante final).

Resumidamente, para o primeiro período de tempo ($t=1$), a demanda dos mercados consumidores é atendida por 4.575.000 unidades de produtos Q, 378.250 unidades de produtos QNC e QEL recuperados, totalizando a quantidade de 4.953.251 de unidades. Desta forma, é possível verificar que a demanda dos mercados consumidores é atendida 99% pelos pontos varejistas no período de tempo $t=1$. O nível de atendimento de 99% é considerado um valor aceitável pois o nível de atendimento mínimo (tg) configurado no modelo é de 90%.

A seguir é apresentado os resultados dos fluxos de transporte para o segundo período de tempo para o cenário realista de demanda realista (RR).

(iv) Fluxos de Transporte no instante inicial de $t=2$

A cada período de tempo a demanda é acrescida 30% do valor do período anterior. Então, para o período de tempo $t=2$ a demanda total dos mercados consumidores é de 6,5 milhões de unidades.

Na Tabela 15 e Figura 17 é possível verificar que o modelo decide produzir 3,250 milhões de unidades de produto acabado em cada fábrica $f1$ e $f2$. O somatório da produção do produto final $p5$ nas fábricas totalizam 6,5 milhões de unidades, igual ao valor da demanda do período.

Tabela 15: Fluxos de Transporte Caso B para $t=2$ (instante inicial).

Pf	v	w	s	t	Q
P5	f1	w1	R	2	3.250.000
P5	f2	w2	R	2	3.250.000
P5	w1	r1	R	2	3.250.000
P5	w2	r2	R	2	3.250.000
P5	r1	m3	R	2	1.625.000
P5	r1	m4	R	2	1.625.000
P5	r2	m1	R	2	1.625.000
P5	r2	m2	R	2	1.625.000

Resultado Caso B, com logística reversa, **instante inicial** para $t=2$

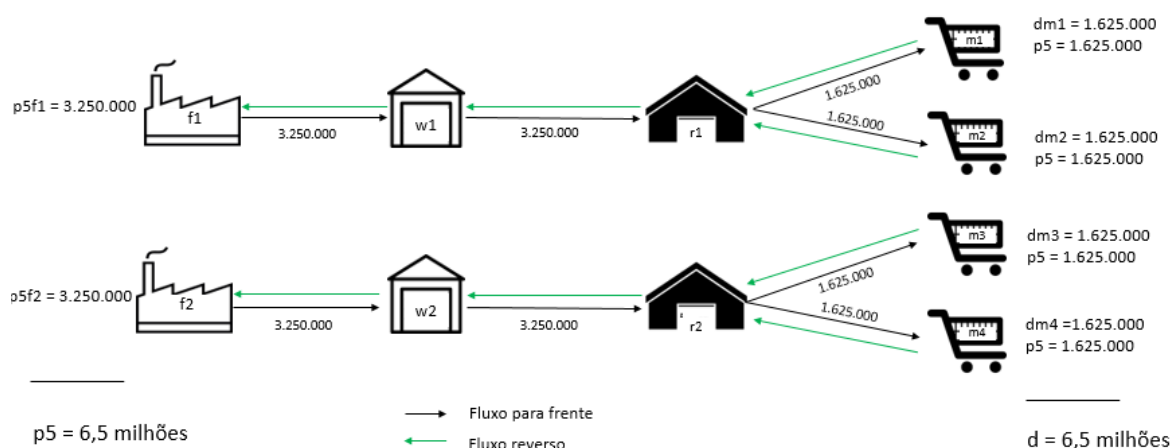


Figura 17: Fluxos de Transporte do Caso B em $t=2$ (instante inicial).

(v) Fluxos de Transporte no instante intermediário de $t=2$

No instante intermediário de $t=2$, os produtos chegam aos mercados consumidores e são reprovados. Da quantidade de 6,5 milhões de unidades que as fábricas f1 e f2 disponibilizam para os clientes são reprovados 227.500 unidades de produtos não conformes (QNC) e 325 mil unidades de produtos em fina de vida útil (QEL), totalizando 552.500 unidades de produtos que retornam às fábricas para serem reconicionados conforme ilustrado na Tabela 16 e Figura 18.

Quando os produtos QNC e QEL chegam nas fábricas passam pela seleção de qualidade. Neste momento o modelo descarta 25.026 unidades (11%) de produtos QNC e 35.750 unidades (11%) de produtos QEL. Após a inspeção, sobram 491.724 unidades aptos para serem reconicionados e retornarem para os mercados consumidores.

Tabela 16: Fluxos de Transporte Caso B para $t=2$ (instante intermediário).

Pf	w	v	s	t	QNC
P5	m1	r1	R	2	56.875
P5	m2	r1	R	2	56.875
P5	m3	r2	R	2	56.875
P5	m4	r2	R	2	56.875
P5	r2	w2	R	2	113.750
P5	r1	w1	R	2	113.750
P5	w1	f1	R	2	113.750
P5	w2	f2	R	2	113.750

Pf	w	v	s	t	QEL
P5	m1	r1	R	2	81.250
P5	m2	r1	R	2	81.250
P5	m3	r2	R	2	81.250
P5	m4	r2	R	2	81.250
P5	r2	w2	R	2	162.500
P5	r1	w1	R	2	162.500
P5	w1	f1	R	2	162.500
P5	w2	f2	R	2	162.500

Pf	v	s	t	dEL	dNC
P5	f1	R	2	17.875	12.513
P5	f2	R	2	17.875	12.513

Resultado Caso B, com logística reversa, **instante intermediário** para t=2

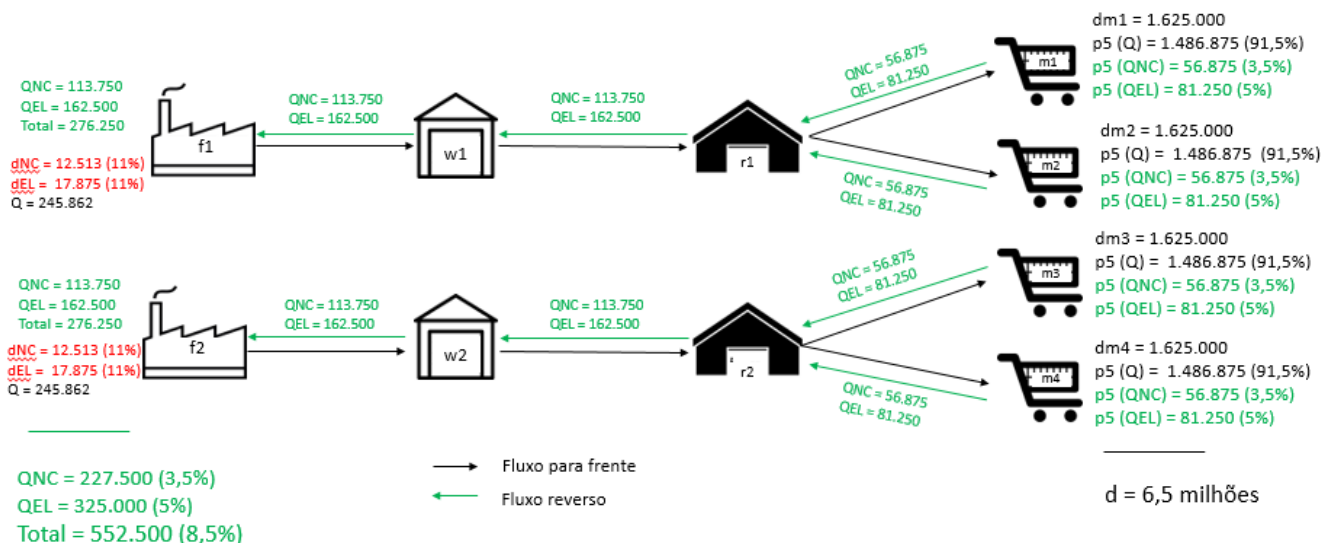


Figura 18: Fluxos de Transporte do Caso B em t=2 (instante intermediário).

(vi) Fluxos de Transporte no instante final de t=2

Conforme Tabela 17 e Figura 19 no instante final a quantidade de 491.724 unidades de produtos recuperados retornam para os mercados consumidores para complementar o atendimento da demanda de 6,5 milhões de unidades do período.

Tabela 17: Fluxos de Transporte Caso B para t=2 (instante final).

Pf	v	w	s	t	Q
P5	f1	w1	R	2	245.862
P5	f2	w2	R	2	245.862
P5	w1	r1	R	2	245.862
P5	w2	r2	R	2	245.862
P5	r1	m3	R	2	122.931
P5	r1	m4	R	2	122.931
P5	r2	m1	R	2	122.931
P5	r2	m2	R	2	122.931

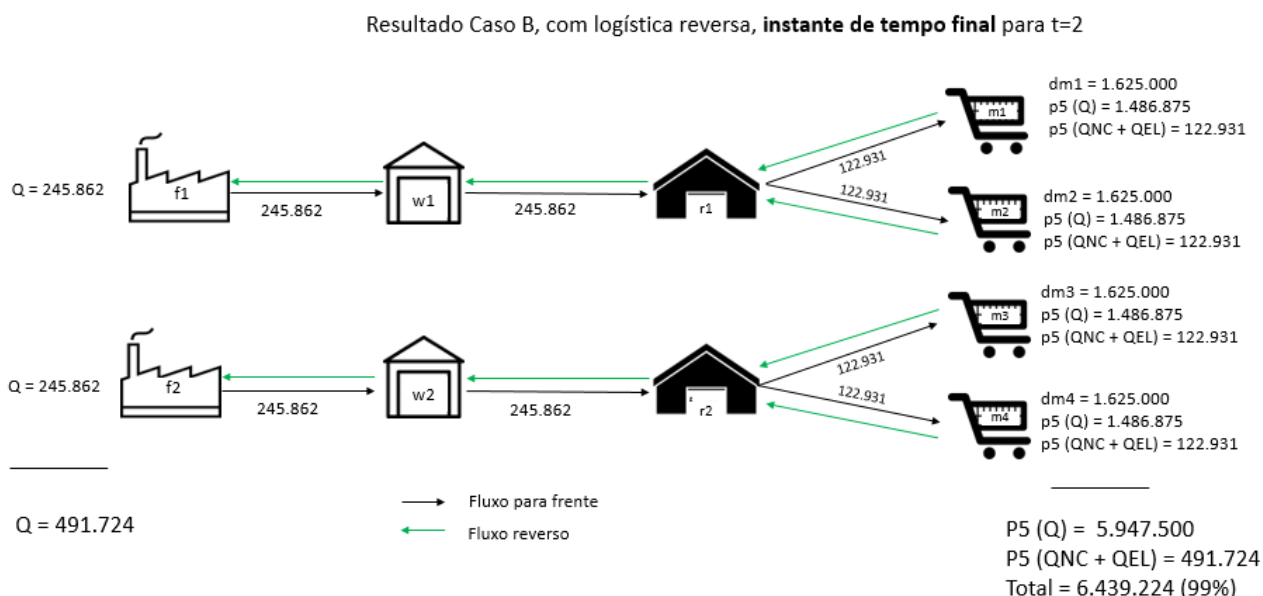


Figura 19: Fluxos de Transporte do Caso B em $t=2$ (instante final).

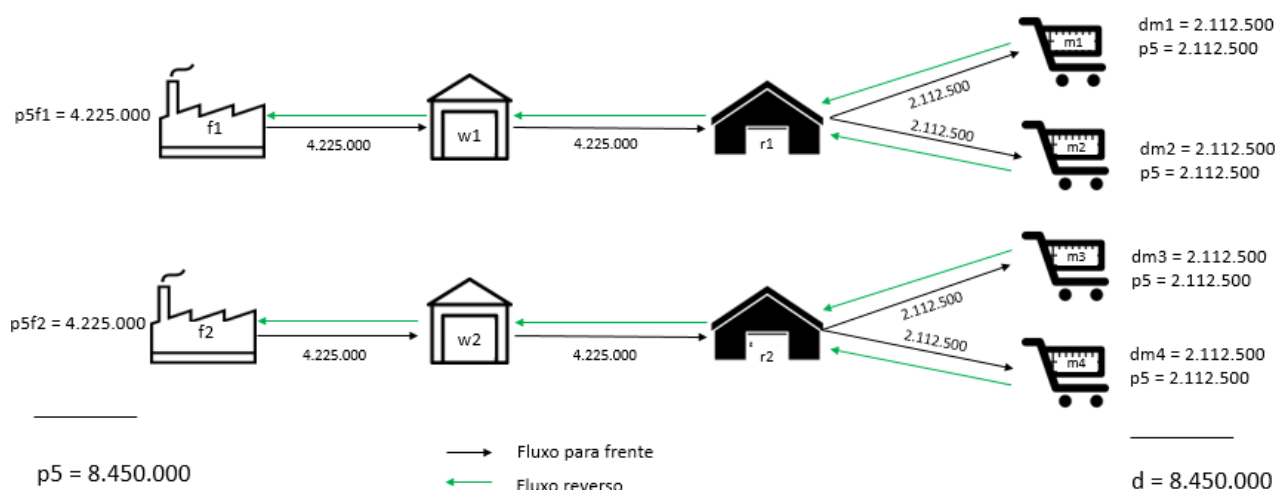
Para o segundo período de tempo ($t=2$), a demanda dos mercados consumidores é atendida por 5.947.500 unidades de produtos Q, 491.724 unidades de produtos QNC e QEL recuperados, totalizando a quantidade de 6.439.224 de unidades. Desta forma, é possível verificar que a demanda dos mercados consumidores é atendida 99% pelos pontos varejistas no período de tempo $t=2$.

(vii) Fluxos de Transporte no instante Inicial de $t=3$

Na Tabela 18 e Figura 20 é possível verificar que o modelo decide produzir na fábrica f1 uma quantidade de 4,225 milhões de unidades de produto acabado e na fábrica f2 a mesma quantidade de 4,225 milhões. O somatório da produção do produto final p5 nas fábricas f1 e f2 totalizam 8,450 milhões de unidades, igual ao valor da demanda do período.

Tabela 18: Fluxos de Transporte Caso B para $t=3$ (instante inicial).

Pf	v	w	s	t	Q
P5	f1	w1	RR	3	4.225.000
P5	f2	w2	RR	3	4.225.000
P5	w1	r1	RR	3	4.225.000
P5	w2	r2	RR	3	4.225.000
P5	r1	m3	RR	3	2.112.500
P5	r1	m4	RR	3	2.112.500
P5	r2	m1	RR	3	2.112.500
P5	r2	m2	RR	3	2.112.500

Resultado Caso B, com logística reversa, **instante inicial** para $t=3$ Figura 20: Fluxos de Transporte do Caso B em $t=3$ (instante inicial).(viii) Fluxos de Transporte no instante intermediário de $t=3$

No instante intermediário de $t=3$ os produtos chegam aos mercados consumidores e são reprovados. Da quantidade de 8,450 milhões de unidades que as fábricas f1 e f2 disponibilizam para os clientes são reprovados 295.748 unidades de produtos não conformes (QNC) e 422.500 unidades de produtos em fina de vida útil (QEL), totalizando 718.248 unidades de produtos que retornam às fábricas para serem reconicionados, conforme ilustrados na Tabela 19 e Figura 21.

Quando os produtos QNC e QEL chegam nas fábricas passam pela inspeção de qualidade, onde são descartados 32.532 unidades (11%) de produtos QNC e

46.476 unidades (11%) de produtos QEL. Após a inspeção, sobram 639.260 unidades aptos para serem reconicionados e retornarem para os mercados consumidores.

Tabela 19: Fluxos de Transporte Caso B para $t=3$ (instante intermediário).

Pf	w	v	s	t	QNC	Pf	w	v	s	t	QEL	Pf	v	s	t	dEL	dNC
P5	m1	r1	RR	3	73.937	P5	m1	r1	RR	3	105.625	P5	f1	RR	3	23.238	16.266
P5	m2	r1	RR	3	73.937	P5	m2	r1	RR	3	105.625	P5	f2	RR	3	23.238	16.266
P5	m3	r2	RR	3	73.937	P5	m3	r2	RR	3	105.625						
P5	m4	r2	RR	3	73.937	P5	m4	r2	RR	3	105.625						
P5	r2	w2	RR	3	147.874	P5	r2	w2	RR	3	211.250						
P5	r1	w1	RR	3	147.874	P5	r1	w1	RR	3	211.250						
P5	w1	f1	RR	3	147.874	P5	w1	f1	RR	3	211.250						
P5	w2	f2	RR	3	147.874	P5	w2	f2	RR	3	211.250						

Resultado Caso B, com logística reversa, instante intermediário para $t=3$

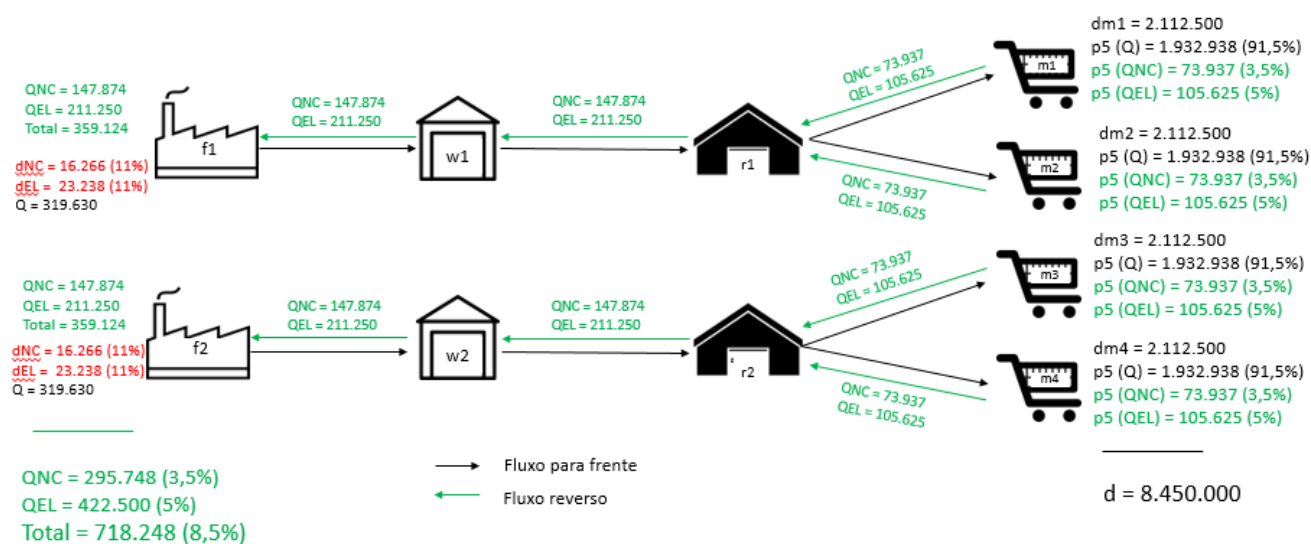


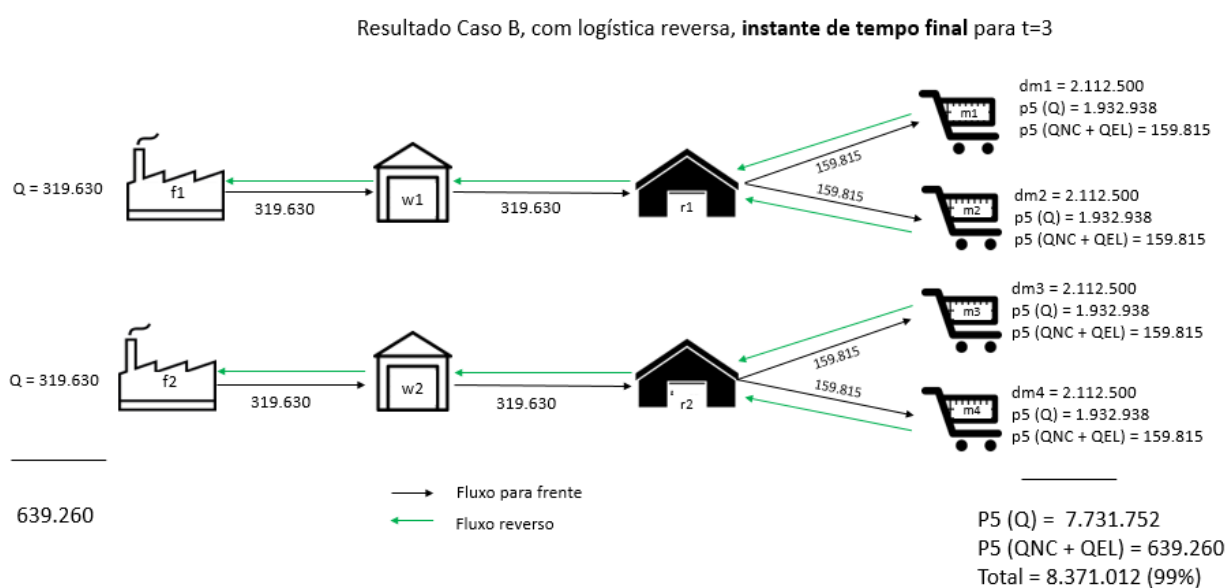
Figura 21: Fluxos de Transporte do Caso B em $t=3$ (instante intermediário).

(ix) Fluxos de Transporte no instante final de $t=3$

Conforme Tabela 20 e Figura 22 no instante final a quantidade de 639.260 unidades de produtos recuperados retornam para os mercados consumidores para complementar o atendimento da demanda de 8,450 milhões de unidades do período. Assim, o modelo recupera dos mercados consumidores 639.260 unidades de produtos que seriam descartados pelos clientes.

Tabela 20: Fluxos de Transporte Caso B para $t=3$ (instante final).

Pf	v	w	s	t	Q
P5	f1	w1	RR	3	319.630
P5	f2	w2	RR	3	319.630
P5	w1	r1	RR	3	319.630
P5	w2	r2	RR	3	319.630
P5	r1	m3	RR	3	159.815
P5	r1	m4	RR	3	159.815
P5	r2	m1	RR	3	159.815
P5	r2	m2	RR	3	159.815

Figura 22: Fluxos de Transporte do Caso B em $t=3$ (instante final).

Logo, para o terceiro período de tempo ($t=3$), a demanda dos mercados consumidores é atendida por 7.731.752 unidades de produtos Q, 639.260 unidades de produtos QNC e QEL recuperados, totalizando a quantidade de 8.371.012 de unidades. Desta forma, é possível verificar que a demanda dos mercados consumidores é atendida 99% pelos pontos varejistas no período de tempo $t=3$.

A seguir são verificados os resultados do Nível de Estoque Médio (IL) nos centros de armazenamento para os casos A e B.

5.3.3 Nível de Estoque Médio

Os resultados de níveis de estoque são importantes para a análise de ocupação do espaço de armazenagem em cada entidade. Estas informações apoiam tomadas de decisão para escolha de expansão do depósito que estoca maior volume de produtos da cadeia de suprimentos. Neste trabalho, devido à alta capacidade inicial de armazenagem (is) configurada nos modelos dos casos A e B não houve necessidade de investimento para expansão.

O Nível de Estoque Médio (IL) é calculado pelo somatório do estoque de produtos para cada centro de distribuição $w1$ e $w2$ e pontos varejistas $r1$ e $r2$ em cada período de tempo t dividido pela taxa de giro de estoque (tor) de 2,4, ou seja, a cada intervalo de tempo t o estoque gira 2,4 vezes no nó de armazenamento da cadeia conforme ilustrado na equação (25) na seção 4 deste trabalho.

A taxa de giro de estoque (tor) é fixada em 2,4, este dado foi fornecido pela área de Gestão dos Estoques (GEST) da empresa do caso real e aplicado nos dados de entrada do modelo a fim de considerar o valor praticado pelo grupo nos centros de distribuição e pontos varejistas. Este valor é calculado a partir de dados históricos dos armazéns e utilizado para projetar o comportamento do nível de estoque médio nos depósitos.

Os resultados do Nível de Estoque Médio (IL) no Caso A para os períodos de tempo $t=1,2$ e 3 estão ilustrados na Tabela 21. O resultado do Nível de Estoque Médio (IL) em $w1$, $w2$, $r1$ e $r2$ em $t=1$ foi de 1,041 milhões de unidades em cada entidade. Isto significa que a quantidade média de produtos que ocupam espaço de armazenagem em cada depósito é de 1,041 milhões de unidades em $t=1$.

A interpretação dos resultados de Níveis de Estoque Médio (IL) para os demais cenários de demanda e períodos de tempo seguem a mesma maneira de análise.

Tabela 21: Nível de estoque médio nos centros de armazenamento Caso A para $t=1,2$ e 3.

Vz	s	t	IL
r1	Rt	1	1.041.667
r2	Rt	1	1.041.667
w2	Rt	1	1.041.667
w1	Rt	1	1.041.667
r1	R	2	1.354.167
r2	R	2	1.354.167
w2	R	2	1354167
w1	R	2	1.354.167
r1	RR	3	1.760.417
r2	RR	3	1.760.417
w2	RR	3	1.760.417
w1	RR	3	1.760.417

Os resultados do Nível de Estoque Médio (IL) no caso B para os períodos de tempo $t=1,2$ e 3 estão ilustrados na Tabela 22. O resultado do Nível de Estoque Médio (IL) em $w1$, $w2$, $r1$ e $r2$ em $t=1$ foi de 1,209 milhões de unidades em cada ponto varejista. Isto significa que a quantidade média de produtos que ocupam espaço de armazenagem os depósitos é de 1,209 milhões de unidades no primeiro período de tempo.

Tabela 22: Nível de estoque médio nos centros de armazenamento Caso B para $t=1,2$ e 3.

Vz	s	t	IL
r1	Rt	1	1.209.010
r2	Rt	1	1.209.010
w2	Rt	1	1.209.010
w1	Rt	1	1.209.010
r1	R	2	1.571.713
r2	R	2	1.571.713
w2	R	2	1.571.713
w1	R	2	1.571.713

Vz	s	t	IL
r1	RR	3	2.043.231
r2	RR	3	2.043.231
w2	RR	3	2.043.231
w1	RR	3	2.043.231

É possível verificar que os valores de IL para o Caso A são menores que em B, isto ocorre devido ao fluxo reverso adicionado no Caso B que aumenta o fluxo de materiais nas entidades de armazenagem exigindo-se dos depósitos maior capacidade de estocagem.

5.4 CÁLCULOS DA LÓGICA TRIBUTÁRIA

Para que o modelo opere com os custos da carga tributária brasileira, foram realizados os cálculos dos novos preços de produção do produto final p5 a partir das equações (39) à (46) apresentadas no capítulo 4. Os novos custos de produção unitários do produto p5 (Oc) com a carga tributária incluída são ilustrados na Tabela 23. Os custos de produção na fábrica *f1* (tecnologia *i1*) são menores que os custos de produção na fábrica *f2* (tecnologia *i2*) devido ao investimento realizado em mobilizado como máquinas, equipamentos e estrutura predial.

Tabela 23: Custos de Produção sem e com impostos para $t=1,2$ e 3.

			Custo de Produção Un. (Oc)	
i	v	t	Sem impostos	Com impostos
i1	f1	1	\$ 8,33	\$ 8,91
i1	f1	2	\$ 10,00	\$ 10,70
i1	f1	3	\$ 12,00	\$ 12,84
i2	f2	1	\$ 9,44	\$ 9,60
i2	f2	2	\$ 11,33	\$ 12,70
i2	f2	3	\$ 13,59	\$ 15,24

A seguir são apresentados os cálculos da lógica tributária e os resultados de cada equação. Primeiramente, o cálculo dos impostos foi realizado para fábrica f1 para os períodos de tempo 1, 2 e 3. Para esta análise não foi considerado o crédito de ICMS da compra de insumos porque a verificação concentrou-se na dinâmica do produto final.

Para o cálculo do débito de ICMS gerado em f1 é considerado a quantidade de produtos bons (Q) que foram produzidos pela fábrica f1 em cada período multiplicado pelo valor do custo de produção e pela taxa de ICMS vigente no Estado em que a fábrica está instalada. A Tabela completa com as taxas de ICMS atualizadas está disponível no Anexo deste trabalho.

Logo em seguida, o saldo total do débito do ICMS é dividido pelo somatório de produtos bons (Q) produzidos pela fábrica no período para obter o novo custo de produção do modelo com o adicional da carga tributária. Posteriormente, este novo custo calculado de Oc é incluído no modelo para análise dos resultados do impacto da cadeia com a inclusão dos custos da carga tributária. Esta análise é apresentada na seção 5.4.

- Fábrica f1 para o período de tempo $t=1$

$$\begin{aligned} ICMS_{f1}^- &= \sum_{(v,w) \in Lf1} Q_{pvwst} \times Oc_{ivpt} \times ICMS_{f1} \\ &= 2.500.000 \times \$8,33 \times 7\% = \$1.457.750 \end{aligned}$$

Débito ICMS por Unidade de Produto Acabado p5
 = \$ 1.457.750 / 2.500.000 = \$ 0,5831 aprox. \$ 0,58

- Fábrica f1 para o período de tempo $t=2$

$$\begin{aligned} ICMS_{f1}^- &= \sum_{(v,w) \in Lf1} Q_{pvwst} \times Oc_{ivpt} \times ICMS_{f1} \\ &= 3.250.000 \times \$9,9960 \times 7\% = \$2.274.090 \end{aligned}$$

Débito ICMS por Unidade de Produto Acabado p5
 = \$ 2.274.090 / 3.250.000 = \$ 0,69972 aprox. \$ 0,70

- Fábrica f1 para o período de tempo $t=3$

$$ICMS_{f1}^- = \sum_{(v,w) \in Lf1} Q_{pvwst} \times Oc_{ivpt} \times ICMS_{f1}$$

$$= 4.225.000 \times \$11,9952 \times 7\% = \$3.547.580,4$$

Débito ICMS por Unidade de Produto Acabado p5

$$= \$ 3.547.580,4 / 4.225.000 = \$ 0,8396 \text{ aprox. } \$ 0,84$$

Na Tabela 24 são apresentados os novos custos de produção de p5 com o adicional da carga tributária para a fábrica f1 nos períodos de tempo $t=1,2,3$.

Tabela 24: Novos custos de produção com Impostos (Oc) em f1 para $t=1,2$ e 3.

i	v	t	Oc	Aumento %
i1	f1	1	8,3300 + 0,58 = 8,91	6,96%
i1	f1	2	9,9960 + 0,70 = 10,696	7,00%
i1	f1	3	11,9952 + 0,84 = 12,8352	7,00%

Após a obtenção dos novos custos de produção de p5 na fábrica f1, foram alterados os valores de Oc para todos os períodos de tempo na Tabela de Dados do Estudo de Caso.

A seguir são apresentados os cálculos da lógica tributária e os resultados para a fábrica f2 para os períodos de tempo 1, 2 e 3. A equação (40) define o Saldo de ICMS atual na Fábrica da Bahia. A equação (41) define o ICMS o que deve ser pago no ato da emissão da nota fiscal. Já a equação (42) define o ICMS que pode ser pago 72 meses após emissão da nota fiscal, conforme benefício oferecido pelo Programa Desenvolve Bahia do Governo Federal Brasileiro.

- Fábrica f2 para o período de tempo $t=1$

$$ICMS_{f2}^- = \sum_{(v,w) \in Lf1} Q_{pvwst} \times Oc_{ivpt} \times ICMS_{f2}$$

$$= 2.500.000 \times \$9,44 \times 18\% = \$4.248.000$$

$$PAGO_{f2} = |SALDO_{f2}| \times 10\%$$

$$= \$4.248.000 \times 10\% = \$424.800$$

$$DESENVOLVE_{f2} = |SALDO_{f2}| \times 90\%$$

$$= \$4.248.000 \times 90\% = \$3.823.200$$

Débito ICMS por Unidade de Produto Acabado
 = \$ 424.800 / 2.500.000 = \$ 0,16992

- Fábrica f2 para o período de tempo $t=2$

$$ICMS_{f2}^- = \sum_{(v,w) \in Lf1} Q_{pvwst} \times Oc_{ivpt} \times ICMS_{f2}$$

$$= 3.250.000 \times \$11,33 \times 18\% = \$6.628.050$$

$$PAGO_{f2} = |SALDO_{f2}| \times 10\%$$

$$= \$6.628.050 \times 10\% = \$662.805$$

$$DESENVOLVE_{f2} = |SALDO_{f2}| \times 90\%$$

$$= \$6.628.050 \times 90\% = \$5.965.245$$

Total = \$ 3.823.200 ($t=1$) + \$ 662.805 ($t=2$) = \$ 4.486.005

Débito ICMS por Unidade de Produto Acabado
 = \$ 4.486.005 / 3.250.000 = \$ 1,38

- Fábrica f2 para o período de tempo $t=3$

$$ICMS_{f2}^- = \sum_{(v,w) \in Lf1} Q_{pvwst} \times Oc_{ivpt} \times ICMS_{f2}$$

$$= 4.225.000 \times \$13,59 \times 18\% = \$10.335.195$$

$$PAGO_{f2} = |SALDO_{f2}| \times 10\%$$

$$= \$10.335.195 \times 10\% = \$1.033.519,5$$

$$DESENVOLVE_{f2} = |SALDO_{f2}| \times 90\%$$

$$= \$10.335.195 \times 90\% = \$9.301.675$$

$$\text{Total} = \$5.965.245 (t=2) + \$ 1.033.519,5 (t=3) = \$ 6.998.764,5$$

Débito ICMS por Unidade de Produto Acabado

$$= \$ 6.998.764,5 / 4.225.000 = \$ 1,65$$

Na Tabela 25 são apresentados os novos custos de produção de p5 com o adicional da carga tributária para a fábrica f2 nos períodos de tempo $t=1,2,3$.

Tabela 25: Novos custos de produção com Impostos (Oc) em f2 para $t = 1, 2$ e 3 .

i	v	t	Oc	Aumento %
i2	f2	1	$9,4400 + 0,16992 = 9,60992$	1,8 %
i2	f2	2	$11,3280 + 1,38 = 12,708$	12,18%
i2	f2	3	$13,5936 + 1,65 = 15,24$	12,13%

Nas próximas seções deste capítulo serão realizadas análises dos resultados dos casos A1 e B1 levando-se em consideração os novos valores dos custos de produção do produto final p5 com a carga tributária para avaliar o impacto dos impostos nos resultados do modelo.

5.5 RESULTADOS DOS CASOS A e A1 (SEM E COM IMPOSTOS)

A seguir, é apresentada a análise dos resultados dos Casos A e A1, sem logística reversa, das Figuras 23 e 24, para dois cenários distintos: sem custos tributários; com custos tributários. O objetivo desta verificação é avaliar o impacto da carga tributária nos resultados da cadeia de suprimentos.

O modelo está configurado para apresentar aumento de 30% da demanda por período.

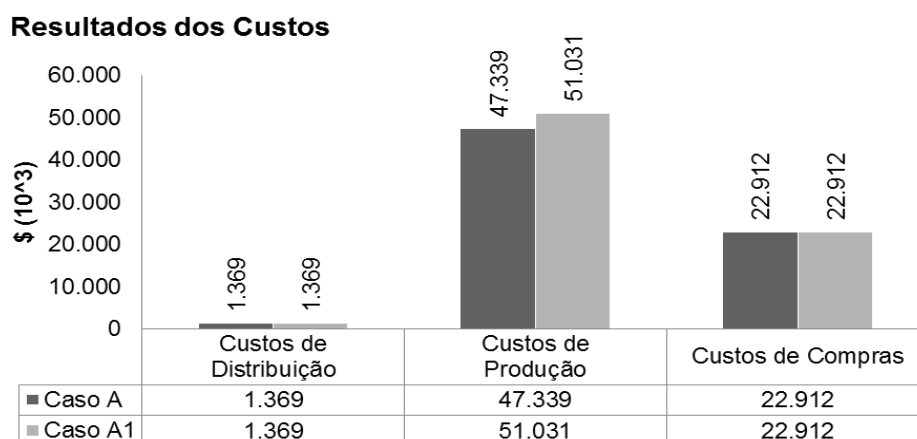


Figura 23: Custos do Caso A, sem impostos e Caso A1, com impostos para $t=1$.

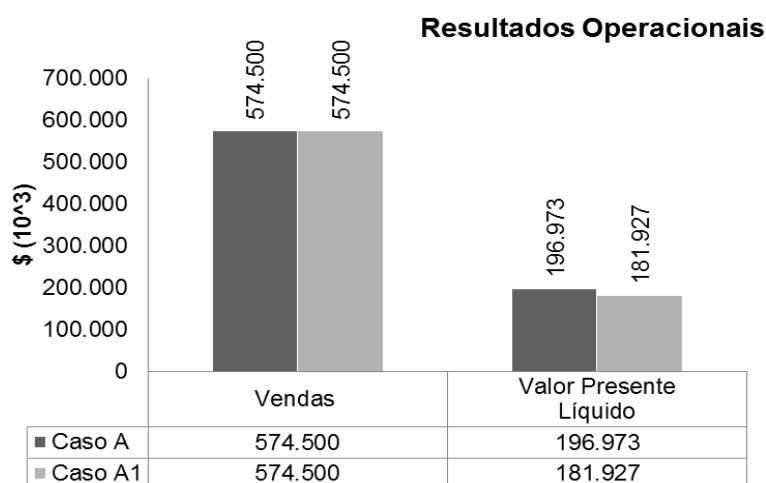


Figura 24: Resultados Operacionais do Caso A, sem impostos e Caso A1 com impostos para $t=1$.

1-Custos de Distribuição

Os custos de distribuição do caso A sem impostos e caso A1 com impostos mantêm-se os mesmos, pois as informações da tabela de dados do parâmetro lk que define o custo do fluxo de transporte de materiais foi mantido o mesmo, uma vez que, a configuração dos custos destes fluxos já está otimizada por um estudo realizado em parceria com uma consultoria fiscal da empresa do caso real.

2-Custos de Produção

Os custos de produção do caso A, sem impostos, para o primeiro período de tempo ($t=1$) é de 47,330 milhões de unidades monetárias. Os custos do caso A1, com impostos, é de 51,031 milhões de unidades monetárias. O aumento dos custos no caso A1 com impostos representa 7,79% do valor do caso A sem impostos devido ao adicional da carga tributária incluído no custo unitário do produto final p5 em f1 e f2.

Analisando-se o aumento dos custos de produção do produto final p5 no primeiro período de tempo ($t=1$), na fábrica f1 o custo alterou de \$ 8,33 para \$ 8,91 um aumento de 6,96% e na fábrica f2 o custo alterou de \$ 9,44 para \$ 9,60 um aumento de somente 1,8% devido ao benefício do Programa Desenvolve para o estado da Bahia.

3-Custos de Compras

Os custos com compras de insumos e matéria-prima em ambos os casos é o mesmo devido às características do projeto da cadeia que considera configuração de lista técnica, preço dos insumos e nível de atendimento da demanda inalterados.

4-Vendas

O resultado de vendas para o caso A, sem impostos, e caso A1, com impostos mantêm-se o mesmo devido às configurações de nível de atendimento da demanda.

5-Valor Presente Líquido

O resultado do Valor Presente Líquido para o caso A sem impostos é de 196,973 milhões de unidades monetárias, enquanto que o resultado para o caso A1 com impostos é de 181,927 milhões de unidades monetárias, ou seja, o resultado do caso A1 com impostos representou uma redução de 15,046 milhões de unidades monetárias (7,63%). Esta redução é justificada pelo aumento dos custos de produção em f1 e f2 para $t=1$ que foi de 8,6%.

5.6 RESULTADOS DOS CASOS B E B1 (SEM E COM IMPOSTOS)

A seguir é realizada a verificação dos resultados dos caso B e B1 com logística reversa sem e com impostos disponíveis nas Figuras 25 e 26 a fim de avaliar o impacto

da carga tributária nos resultados da cadeia. O modelo está configurado para apresentar aumento de demanda de 30% por período.

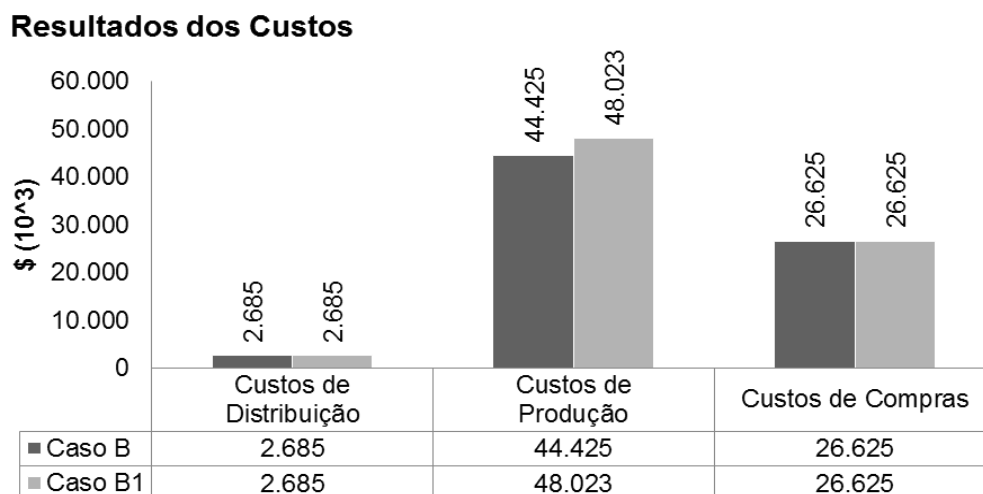


Figura 25: Custos dos casos B e B1, sem e com impostos para $t=1$.

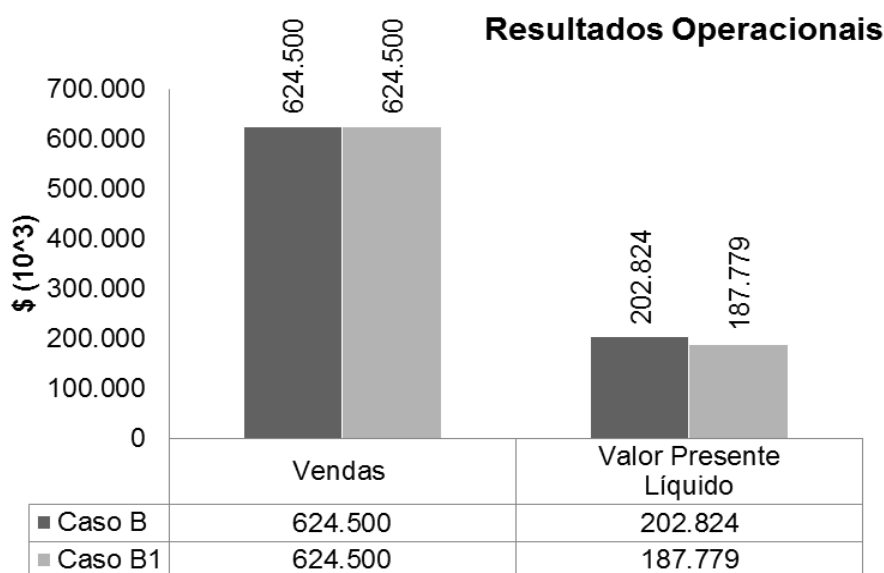


Figura 26: Resultados Operacionais dos casos B e B1, sem e com impostos para $t=1$.

1-Custos de Distribuição

Assim como os custos de distribuição dos casos A e A1, os custos do caso B sem impostos e caso B1 com impostos mantêm-se os mesmos, pelo motivo de que os dados do parâmetro lk que define o resultado dos custos de transporte do fluxo de materiais foi mantido o mesmo nos casos B e B1 sem e com carga tributária.

2-Custos de Produção

Os custos de produção do caso B, sem impostos, para o primeiro período de tempo ($t=1$) é de 44,325 milhões de unidades monetárias. Os custos do caso B1, com impostos, é de 48.023 milhões de unidades monetárias. O aumento dos custos no caso com impostos representa 8,09% do valor do caso sem impostos devido ao adicional da carga tributária incluído no custo unitário do produto final p5 em f1 e f2.

Os custos de produção do produto final p5 no primeiro período de tempo ($t=1$), na fábrica f1 alteraram de \$ 8,33 (sem impostos) para \$ 8,91 (com impostos) um aumento de 6,96% e na fábrica f2 o custo alterou de \$ 9,44 para \$ 9,60 um aumento de somente 1,7% devido ao benefício do Programa Desenvolve.

3-Custos de Compras

Os custos com compras de insumos e matéria-prima em ambos os casos é o mesmo devido as características do projeto da cadeia que considera configuração de lista técnica, preço dos insumos e nível de atendimento da demanda inalterados.

4-Vendas

O resultado de vendas para o caso B, sem impostos, e caso B1, com impostos mantêm-se o mesmo devido às configurações de nível de atendimento da demanda.

5-Valor Presente Líquido

O resultado do Valor Presente Líquido para o caso B sem impostos é de 202,824 milhões de unidades monetárias, enquanto que o resultado para o caso B1 com impostos é de 187,779 milhões de unidades monetárias, ou seja, o resultado do caso com impostos representou uma redução de \$ 15.045 (7,4%). Esta diferença ocorre devido ao aumento dos custos de produção (Oc) com o adicional da carga tributária de 8,6% nos custos do produto final p5.

Alteração do *mix* de produção

Os resultados do fluxo de saída de produtos bons (Q) dos processos de tecnologia (Out) e processos de retrabalho (Outd) das fábricas f1 e f2 não variaram entre os casos A e B sem impostos e casos A1 e B1 com impostos. Desta forma, não

ocorreu alteração no *mix* de produção entre as plantas f1 e f2 porque o projeto do modelo considera apenas um único produto acabado p5.

5.7 CÁLCULO DO CUSTO DE OPORTUNIDADE

A seguir é apresentado o cálculo do custo de oportunidade para o estudo de Caso B1, com logística reversa e com impostos, para a fábrica f2 que é beneficiada pelo incentivo de desoneração fiscal. O custo de oportunidade é o cálculo dos rendimentos referentes ao valor de impostos não pagos pela empresa captados pelo benefício do Programa Desenvolve Bahia que concede dilação do prazo de até 72 meses para pagamento da taxa de ICMS.

Para o cálculo do custo de oportunidade é utilizada a equação (47) a qual realiza a multiplicação do valor não pago de ICMS no período de tempo t pela taxa CDI (Certificado de Depósito Interbancário) vigente. Os resultados desta equação referem-se aos rendimentos do valor não pago de impostos no período de tempo t . Para o cálculo foi considerado uma taxa CDI de 0,9%, este valor refere-se a taxa média anual utilizada pela empresa para projeções de ganhos do custo de oportunidade. O benefício do Programa Desenvolve é de dilatação do prazo do pagamento do ICMS de até 72 meses. Desta forma, o valor do custo de oportunidade mensal é multiplicado por 72 meses para obter o rendimento total do benefício.

- Fábrica f2 para o período de tempo $t=1$

$$Custo_{op} = ICMS_{p2DESENVOLVE} \times Taxa_{CDI\ mensal}$$

$$Custo_{op} = \$ 3.823.200 \times 0,9\% = \$ 34.407/\text{mês}$$

$$Custo_{op} = \$ 34.407 \times 72 \text{ meses} = \$ 2.477.304$$

- Fábrica f2 para o período de tempo $t=2$

$$Custo_{op} = ICMS_{p2DESENVOLVE} \times Taxa_{CDI\ mensal}$$

$$Custo_{op} = R\$ 5.965.245 \times 0,9\% = \$ 53.687,2$$

$$Custo_{op} = \$ 53.687,2 \times 72 \text{ meses} = \$ 3.865.478,76$$

- Fábrica f2 para o período de tempo $t=3$

$$Custo_{op} = ICMS_{p2DESENVOLVE} \times Taxa_{CDI\ mensal}$$

$$Custo_{op} = \$9.301.675 \times 0,9\% = \$ 83.715,07$$

$$Custo_{op} = \$ 83.715,07 \times 72 \text{ meses} = \$ 6.027.485,4$$

Os demais nós da cadeia (centros de distribuição, pontos varejistas e mercados consumidores) também estão sob a ação de regras tributárias, este trabalho concentrou a análise do impacto dos impostos somente para as fábricas f1 e f2. A complexidade de incluir no projeto da cadeia de suprimentos a carga tributária brasileira em todos os nós é um desafio que motiva futuros trabalhos.

A seguir são apresentados na Tabela 26 os resultados do caso B1, com logística reversa, do custo de oportunidade referente aos rendimentos do valor não pago de impostos devido ao benefício de dilação do prazo de pagamento do ICMS oferecido pelo Programa Desenvolve Bahia do Governo Federal Brasileiro.

Tabela 26: Custo de Oportunidade em f2 para $t = 1, 2$ e 3 .

t	Custo de Oportunidade
1	\$ 2.477.304,00
2	\$ 3.865.478,76
3	\$ 6.027.485,4
Total	\$ 12.370.268,2

O volume de produção na fábrica f2 localizada no estado da Bahia somando-se os três períodos de tempo foi de aproximadamente 9,975 milhões de unidades de produto final p5 (Q) conforme somatório das Tabelas 11 ($t=1$), 14 ($t=2$) e 17 ($t=3$), pois o volume de produção dos casos B e B1 são iguais. Este volume de produção foi faturado, ou seja, foram emitidas notas fiscais, para os centros de distribuição w1 e w2, gerando-se débitos de ICMS para cada nota fiscal emitida.

Conforme flexibilidade do benefício fiscal que estende o prazo para pagamento da alíquota de ICMS em até 72 meses, o valor dos impostos não pagos apresentar rendimentos, conforme taxa CDI, do total de aproximadamente 12 milhões de unidades

monetárias. Reforçando, este valor refere-se somente aos lucros dos rendimentos da desoneração do imposto.

A seguir, é apresentada a análise dos custos de produção do produto acabado p5 com a redução do ganho do custo de oportunidade em cada período de tempo t do custo de produção de p5 da fábrica f2 para verificar o impacto nos resultados do Valor Presente Líquido do período.

Os custos de produção do produto final p5 na fábrica f2, considerando os custos tributários, para o primeiro período de tempo t é de 24 milhões de unidades monetárias (produto da quantidade de 2,5 milhões de unidades de produtos Q fabricados em f2 em $t=1$ pelo custo de produção unitário em f2 de \$ 9,6).

Já o custo de produção sem a carga tributária é de 23,6 milhões de unidades monetárias (produto da quantidade de 2,5 milhões de unidades de produtos Q fabricados em f2 em $t=1$ pelo custo de produção unitário em f2 de \$ 9,44).

Considerando o ganho do custo de oportunidade do primeiro período de tempo ($t=1$) de \$ 2.477.304, os custos de produção do produto final p5 na fábrica f2 referente ao Caso B1, com impostos, caem para 21,523 milhões de unidades monetárias.

O custo unitário de produção de p5, considerando um volume de produção em f2 de 2,5 milhões de unidades de produtos Q no primeiro período de tempo ($t=1$) é de \$ 9,60 com a carga tributária incluída. Após a redução do ganho com o custo de oportunidade do Programa Desenvolve Bahia este preço unitário é ajustado para de \$ 8,61, uma redução de 10,27%. De forma similar, a análise é feita para os outros dois períodos de tempo.

Este benefício colabora diretamente para o aumento do fluxo de caixa do período (CF), conseqüentemente trazendo mais receita (Valor Presente Líquido) em curtíssimo prazo para a empresa.

5.8 ANÁLISE DA DESONERAÇÃO FISCAL E LOGÍSTICA REVERSA

A seguir é apresentada a análise dos resultados do custo de oportunidade da desoneração fiscal comparativamente com os custos de distribuição para cadeia operar com atividades de logística reversa a fim de responder as questões abaixo.

- (i) Quanto é preciso de incentivo fiscal para compensar os custos nas atividades de logística reversa da cadeia?
- (ii) Que valor a empresa pode investir em práticas de logística reversa, utilizando como limitador o benefício da desoneração fiscal do Programa Desenvolve, sem que haja impacto negativo no Valor Presente Líquido do período?

Iniciando pela primeira questão, o Benefício Fiscal que é apresentado em forma de custo de oportunidade, para o primeiro período de tempo ($t=1$) foi de 2,477 milhões de unidades monetárias.

O custo adicional com distribuição para a cadeia operar com atividades de logística reversa no caso B1 para o primeiro período de tempo ($t=1$) comparando com o caso A1, sem logística reversa, foi de 1,316 milhões de unidades monetárias. Respondendo a primeira questão, o ganho com custo de oportunidade para o primeiro período de tempo compensa os custos logísticos de distribuição para operar logística reversa e ainda há uma sobra de 1,161 milhões de unidades monetárias dos rendimentos do período.

Sobre a segunda questão, pode ser utilizado como limitador para investimentos em logística reversa o próprio custo de oportunidade do período que para $t=1$ é de 2,477 milhões de unidades monetárias.

O volume de produtos não conformes (QNC) e em final de vida útil (QEL) que foram recuperados no caso B, com logística reversa, no primeiro período de tempo foi de 425 mil unidades com custos de distribuição de 1,316 milhões de unidades monetárias. Caso se utilize o valor total do ganho com custo de oportunidade em logística reversa no primeiro período de tempo ($t=1$) seria possível recuperar dos mercados consumidores um total de 799.943 unidades, aproximadamente 800 mil.

Portanto, o ganho com os rendimentos do montante que não é destinado para pagamento dos impostos paga os custos com Logística Reversa.

Esta análise é interessante para tomada de decisão de investimentos para o processo de recuperação de produtos defeituosos do mercado. Sendo possível adicionar uma nova restrição no modelo que limite a quantidade de produtos que devem retornar aos centros de retrabalho sem impactar os resultados do Valor Presente Líquido do período.

5.9 RESULTADOS DO CASO B2 (INCERTEZAS NA DEMANDA)

5.9.1 Probabilidades (pb) de cenários e variação de demanda (vd)

A cadeia de suprimentos da empresa estudada opera para o abastecimento de mercados consumidores localizados em diferentes regiões do país sendo extremamente difícil prever a exata demanda de cada produto. Dessa forma, é importante considerar incerteza no projeto da cadeia para análise dos resultados em diferentes cenários de demanda.

Nesta seção, são apresentados os resultados para o caso B2, com logística reversa e com incertezas, configurado para apresentar aumento de 30% da demanda por período. Os valores das probabilidades (pb) e variação de demanda (vds) para os três períodos de tempo são apresentados nas Figura 27 e 28, conforme abordagem proposta por Tsiakis *et al.* (2001). A função objetivo é a média do Valor Presente Líquido, obtida pelo VPL de cada cenário ponderado pela respectiva probabilidade (pb) do cenário.

Os valores da variação de demanda inicial do nó (vds) nos períodos de tempo $t=1$ e $t=2$ assumem valores arbitrários positivos para cenários otimistas, que representam aumento de demanda, e valores negativos para cenários realistas e pessimistas, que representam redução da demanda no período. Para o terceiro período de tempo, a variação de demanda (vds) do nó é calculada pela multiplicação do nó antecessor pela variação de demanda (vds) do nó s.

Para o Caso B2, no primeiro período de tempo a probabilidade (pb) é 100% e a variação de demanda (vds) é -0,01. Para o segundo período de tempo são considerados três diferentes probabilidades (pb) e variações de demanda (vds):

- (i) Otimista, o qual considera um aumento de demanda de 25% no período seguinte com uma probabilidade de 0,45;
- (ii) Realista que considera uma redução de demanda de 1% com uma probabilidade de 0,3;
- (iii) Pessimista, o qual assume uma redução de demanda de 53% com uma probabilidade de 0,25.

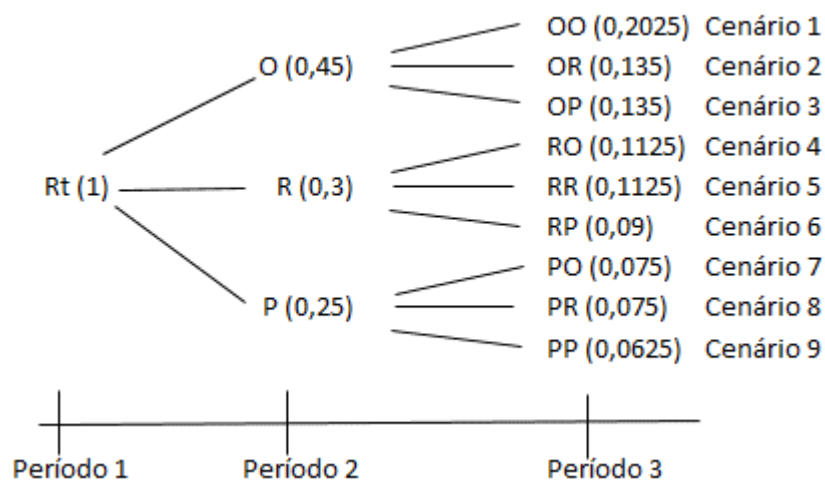


Figura 27: Probabilidade (p_b) dos cenários para o caso B2.

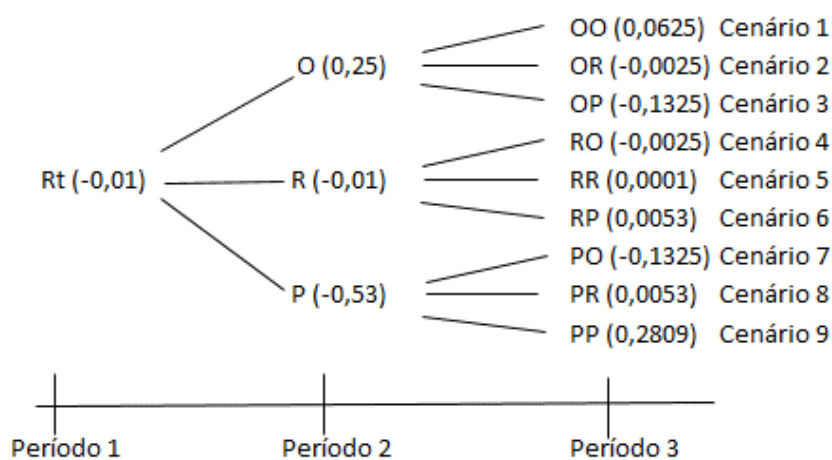


Figura 28: Variação de demanda (vds) para cada cenário S para o caso B2.

Para o terceiro período de tempo são considerados nove cenários diferentes conforme apresentados abaixo:

- (i) Otimista Otimista (OO), o qual considera um aumento de demanda de 6,25% no período seguinte com uma probabilidade de 0,2025;
- (ii) Otimista Realista (OR) que considera uma redução de demanda de 0,25% com uma probabilidade de 0,135;

- (iii) Otimista Pessimista (OP), o qual assume uma redução de demanda de 13,25% com uma probabilidade de 0,135;
- (iv) Realista Otimista (RO) que considera uma redução de demanda de 0,25% com uma probabilidade de 0,1125;
- (v) Realista Realista (RR) o qual assume um aumento de demanda de 0,01% com uma probabilidade de 0,1125;
- (vi) Realista Pessimista (RP) que considera um aumento de demanda de 0,53% com uma probabilidade de 0,09;
- (vii) Pessimista Otimista (PO) o qual assume uma redução de demanda de 13,25% com uma probabilidade de 0,075;
- (viii) Pessimista Realista (PR) que considera um aumento de demanda de 0,53% com uma probabilidade de 0,075;
- (ix) Pessimista Pessimista (PP) o qual assume uma redução de demanda de 28,09% com uma probabilidade de 0,0625.

O somatório das probabilidades (pb) em cada período resultam em 1. A distribuição das probabilidades é realizada de maneira aleatória conforme proposto por Tsiakis *et al.* (2001) e utilizado no trabalho de Cardoso *et al.* (2013).

A Tabela 27 mostra os valores da variação de demanda (vds) e as probabilidades (pb) para cada nó s da árvore de cenários para o Caso B2.

Tabela 27: Probabilidades (pb) de cenários e variação de demanda (vd) para cada período de tempo t .

K	Tempo	pb	vds
Rt	1	1	-0,01
O	2	0,25	0,25
R	2	0,3	-0,01
P	2	0,25	-0,53
OO	3	0,2025	0,0625

K	Tempo	pb	vds
OR	3	0,135	-0,0025
OP	3	0,135	-0,1325
RO	3	0,1125	-0,0025
RR	3	0,1125	0,0001
RP	3	0,09	0,0053
PO	3	0,075	-0,1325
PR	3	0,075	0,0053
PP	3	0,0625	0,2809

A seguir são apresentados os resultados dos fluxos de transporte para o caso B2, com logística reversa e com incertezas para no cenário realista de demanda para o primeiro período de tempo.

5.9.2 Fluxos de Transporte caso B2

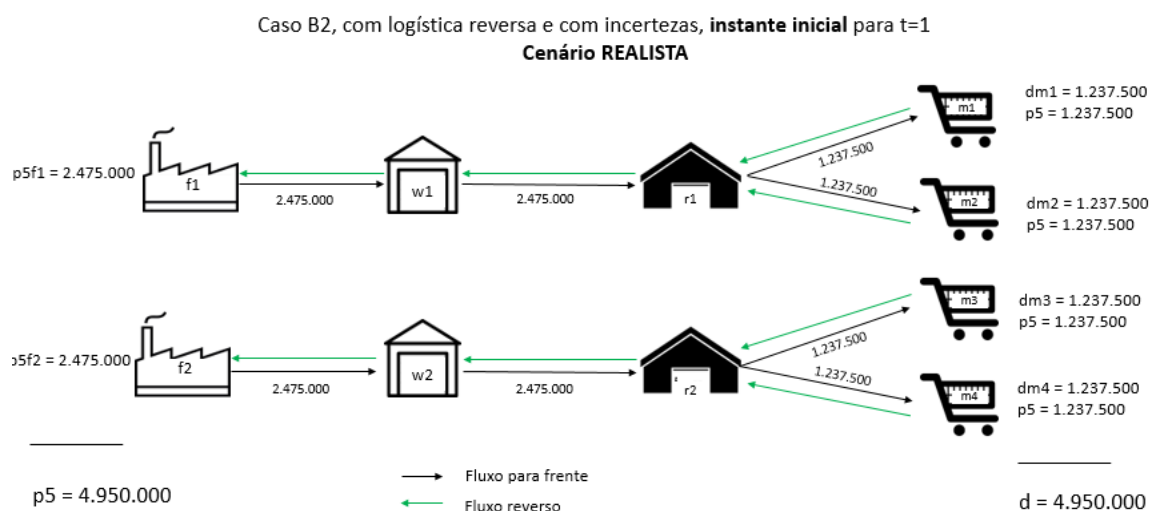
Para a interpretação dos resultados dos fluxos de transporte do caso B2, os períodos de tempo t são divididos em três instantes ou momentos de tempo: (i) instante inicial; (ii) instante intermediário e (iii) instante final.

(i) Fluxos de Transporte no instante Inicial de $t=1$

A análise dos fluxos é iniciada pelo instante inicial do período de tempo $t=1$. Na Tabela 28 e Figura 29 é possível verificar que o modelo decide produzir na fábrica f1 uma quantidade de 2.475.000 unidades de produto acabado e na fábrica f2 a mesma quantidade de 2.475.000 unidades. O somatório da produção do produto final p5 nas fábricas f1 e f2 totalizam 4,95 milhões de unidades, igual ao valor da demanda do período.

Tabela 28: Fluxos de Transporte Caso B2 para $t=1$ (instante inicial).

Pf	v	w	s	t	Q
P5	f1	w1	Rt	1	2.475.000
P5	f2	w2	Rt	1	2.475.000
P5	w1	r1	Rt	1	2.475.000
P5	w2	r2	Rt	1	2.475.000
Pf	v	w	s	t	Q
P5	r1	m3	Rt	1	1.237.500
P5	r1	m4	Rt	1	1.237.500
P5	r2	m1	Rt	1	1.237.500
P5	r2	m2	Rt	1	1.237.500

Figura 29: Fluxos de Transporte do Caso B2 em $t=1$ (instante inicial).(ii) Fluxos de Transporte no instante intermediário de $t=1$

No instante intermediário de $t=1$ os produtos chegam aos mercados consumidores e são reprovados. Da quantidade de 4,95 milhões de unidades que as fábricas f1 e f2 disponibilizam para os clientes são reprovados 173.252 unidades de produtos não conformes (QNC) e 247.500 unidades de produtos em fina de vida útil (QEL), totalizando 420.752 unidades de produtos que retornam às fábricas para serem reconicionados, conforme ilustrados na Tabela 29 e Figura 30.

Quando os produtos QNC e QEL chegam nas fábricas passam por uma seleção para verificar as condições de qualidade necessárias para serem recuperados, caso os produtos reprovem na seleção de qualidade são descartados.

O modelo do caso B2, assim como o caso B, considera que 11% dos produtos QNC que chegam nas fábricas para serem recuperados são descartados, 19.056 unidades, e 11% dos produtos QEL, 27.224 unidades. Este valor de 11% é o mesmo utilizado pelo casos Real, a empresa considera estes valores no orçamento anual de descarte.

Após a inspeção, sobram 374.472 unidades aptos para serem reconicionados e retornarem para os mercados consumidores como produtos bons (Q).

Tabela 29: Fluxos de Transporte Caso B2 para $t=1$ (instante intermediário).

Pf	w	v	s	t	QNC
P5	m1	r1	Rt	1	43.313
P5	m2	r1	Rt	1	43.313
P5	m3	r2	Rt	1	43.313
P5	m4	r2	Rt	1	43.313
P5	r2	w2	Rt	1	86.626
P5	r1	w1	Rt	1	86.626
P5	w1	f1	Rt	1	86.626
P5	w2	f2	Rt	1	86.626

Pf	w	v	s	t	QEL
P5	m1	r1	Rt	1	61.875
P5	m2	r1	Rt	1	61.875
P5	m3	r2	Rt	1	61.875
P5	m4	r2	Rt	1	61.875
P5	r2	w2	Rt	1	123.750
P5	r1	w1	Rt	1	123.750
P5	w1	f1	Rt	1	123.750
P5	w2	f2	Rt	1	123.750

Pf	v	s	t	dEL	dNC
P5	f1	Rt	1	13.612	9.528
P5	f2	Rt	1	13.612	9.528

Caso B2, com logística reversa e com incertezas, **instante intermediário** para $t=1$
Cenário REALISTA

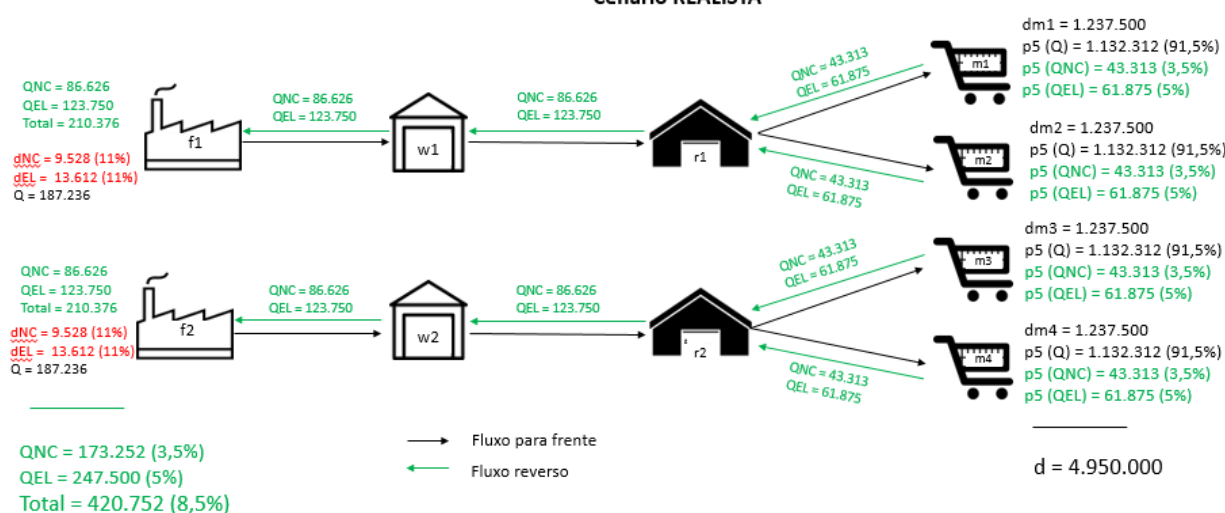


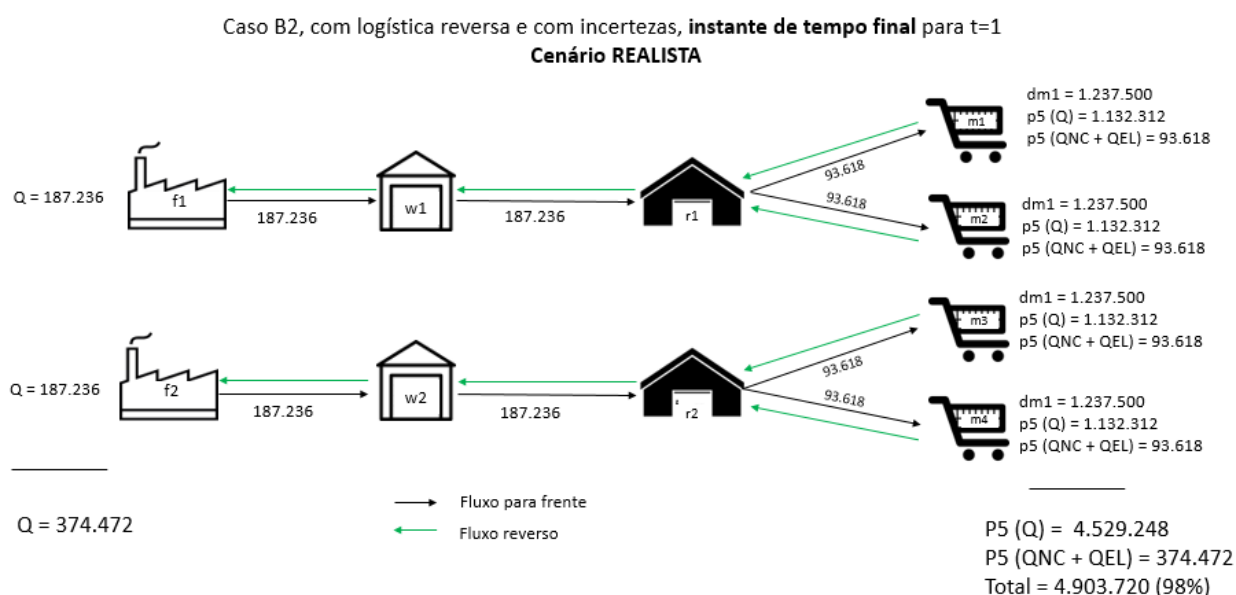
Figura 30: Fluxos de Transporte do Caso B2 em $t=1$ (instante intermediário).

(iii) Fluxos de Transporte no instante final de $t=1$

Conforme Tabela 30 e Figura 31 no instante final a quantidade de 374.472 unidades de produtos recuperados retornam para os mercados consumidores para complementar o atendimento da demanda de 4,95 milhões de unidades do período. Assim, o modelo recupera dos mercados consumidores 374.472 unidades de produtos que seriam descartados pelos clientes.

Tabela 30: Fluxos de Transporte Caso B2 para $t=1$ (instante final).

Pf	v	w	s	t	Q
P5	f1	w1	Rt	1	187.236
P5	f2	w2	Rt	1	187.236
P5	w1	r1	Rt	1	187.236
P5	w2	r2	Rt	1	187.236
P5	r1	m3	Rt	1	93.618
P5	r1	m4	Rt	1	93.618
P5	r2	m1	Rt	1	93.618
P5	r2	m2	Rt	1	93.618

Figura 31: Fluxos de Transporte do Caso B2 em $t=1$ (instante final).

Logo, para o primeiro período de tempo ($t=1$), a demanda dos mercados consumidores é atendida por 4.529.248 unidades de produtos Q, 374.472 unidades de produtos QNC e QEL recuperados, totalizando a quantidade de 4.903.720 de unidades.

Desta forma, é possível verificar que a demanda dos mercados consumidores é atendida 98% pelos pontos varejistas no período de tempo $t=1$. O nível de atendimento de 98% é considerado um valor aceitável pois o nível de atendimento mínimo (tg) configurado no modelo é de 90%.

Nota-se ainda que o nível de atendimento no caso B2, com incertezas, caiu 1% comparando-se com o resultado do Caso B, sem incertezas.

A análise dos resultados para os demais períodos é feita de forma similar. A seguir são apresentados os resultados para os três cenários do período dois na Tabela 31 e os nove cenários do período três na Tabela 32.

Tabela 31: Fluxos de Transporte Caso B2 para $t=2$, cenário Realista.

Pf	v	w	s	t	Q
P5	f1	w1	R	2	3.250.000
P5	f2	w2	R	2	3.250.000
P5	w1	r1	R	2	3.250.000
P5	w2	r2	R	2	3.250.000
P5	r1	m3	R	2	1.625.000
P5	r1	m4	R	2	1.625.000
P5	r2	m1	R	2	1.625.000
P5	r2	m2	R	2	1.625.000

Pf	w	v	s	t	QNC
P5	m1	r1	R	2	56.875
P5	m2	r1	R	2	56.875
P5	m3	r2	R	2	56.875
P5	m4	r2	R	2	56.875
P5	r2	w2	R	2	113.750
P5	r1	w1	R	2	113.750
P5	w1	f1	R	2	113.750
P5	w2	f2	R	2	113.750

Pf	w	v	s	t	QEL
P5	m1	r1	R	2	81.250
P5	m2	r1	R	2	81.250
P5	m3	r2	R	2	81.250
P5	m4	r2	R	2	81.250
P5	r2	w2	R	2	162.500
P5	r1	w1	R	2	162.500
P5	w1	f1	R	2	162.500
P5	w2	f2	R	2	162.500

Pf	v	s	t	dEL	dNC
P5	f1	R	2	17.875	12.513
P5	f2	R	2	17.875	12.513

Pf	V	w	s	t	Q
P5	f1	w1	R	2	245.862
P5	f2	w2	R	2	245.862
P5	w1	r1	R	2	245.862
P5	w2	r2	R	2	245.862
P5	r1	m3	R	2	122.931
P5	r1	m4	R	2	122.931
P5	r2	m1	R	2	122.931
P5	r2	m2	R	2	122.931

Tabela 32: Fluxos de Transporte Caso B2 para $t=3$, cenário Realista Realista.

Pf	v	w	s	t	Q
P5	f1	w1	RR	3	4.225.000
P5	f2	w2	RR	3	4.225.000
P5	w1	r1	RR	3	4.225.000
P5	w2	r2	RR	3	4.225.000
P5	r1	m3	RR	3	2.112.500
P5	r1	m4	RR	3	2.112.500
P5	r2	m1	RR	3	2.112.500
P5	r2	m2	RR	3	2.112.500

Pf	w	v	s	t	QNC
P5	m1	r1	RR	3	73.937
P5	m2	r1	RR	3	73.937
P5	m3	r2	RR	3	73.937
P5	m4	r2	RR	3	73.937
P5	r2	w2	RR	3	147.874
P5	r1	w1	RR	3	147.874
P5	w1	f1	RR	3	147.874
P5	w2	f2	RR	3	147.874

Pf	w	v	s	t	QEL
P5	m1	r1	RR	3	105.625
P5	m2	r1	RR	3	105.625
P5	m3	r2	RR	3	105.625
P5	m4	r2	RR	3	105.625
P5	r2	w2	RR	3	211.250
P5	r1	w1	RR	3	211.250
P5	w1	f1	RR	3	211.250
P5	w2	f2	RR	3	211.250

Pf	v	s	t	dEL	dNC
P5	f1	RR	3	23.238	16.266
P5	f2	RR	3	23.238	16.266

Pf	V	w	s	t	Q
P5	f1	w1	RR	3	319.630
P5	f2	w2	RR	3	319.630
P5	w1	r1	RR	3	319.630
P5	w2	r2	RR	3	319.630
P5	r1	m3	RR	3	159.815
P5	r1	m4	RR	3	159.815
P5	r2	m1	RR	3	159.815
P5	r2	m2	RR	3	159.815

A seguir são apresentados os resultados operacionais do modelo para os casos B, com logística reversa e sem incertezas e para o caso B2, com logística reversa e com incertezas.

5.9.3 Resultados Operacionais para os casos B e B2

Para o caso B2, não foram considerados aumentos de 20% nos custos operacionais porque o objetivo é verificar o impacto nos resultados operacionais para as diferentes probabilidades (pb) de cenários e variações de demanda (vd). Os resultados operacionais e custos dos casos B e B2 são apresentados nas Figuras 32 e 33. Os resultados do caso B2 para os períodos de tempo 2 e 3 são calculados pela média dos resultados da probabilidade de cada cenário.

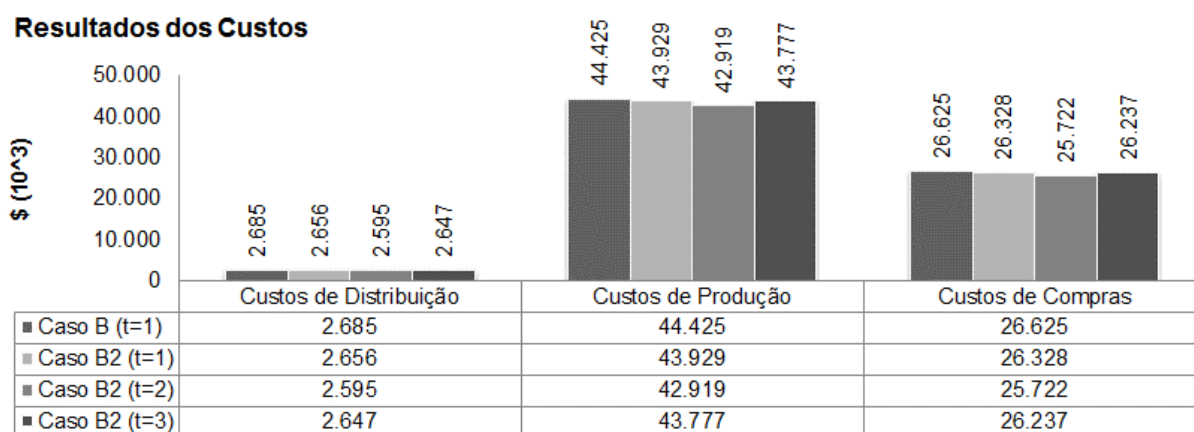


Figura 32: Resultados Operacionais do caso B para $t=1$ e caso B2 para $t = 1, 2$ e 3 .

1-Custos de Distribuição

O resultado dos custos de distribuição no caso B2 em $t=1$ foi de \$ 2.656, 1,08% menor que os custos do caso B de \$ 2,685 no mesmo período. Isto ocorre devido ao volume de produção em $f1$ e $f2$ no caso B que totaliza 5 milhões de unidades no período de tempo $t=1$, enquanto que o volume de produção em $f1$ e $f2$ no caso B2 totaliza 4.950.000 unidades de produtos acabados $p5$ para o mesmo período, ou seja, uma redução de 1% do volume que precisa ser distribuído e entregue aos mercados consumidores.

2-Custos de Produção

Os custos de produção do caso B2, com incertezas, para o período de tempo $t=1$ sofrem uma redução de 1,11% em relação ao caso B. Esta redução também é justificada pela redução de 1% no volume de produção nas fábricas f1 e f2 devido às variações de probabilidade (pb) e demanda (vd) inseridas na cadeia.

3-Custos de Compras

Os custos de compras do caso B2 em $t=1$ também sofrem uma redução de 1,11% em relação ao caso B justificada pela diferença de 50.000 unidades de produtos que não são produzidos devido às variações inseridas na cadeia do modelo do caso B2.

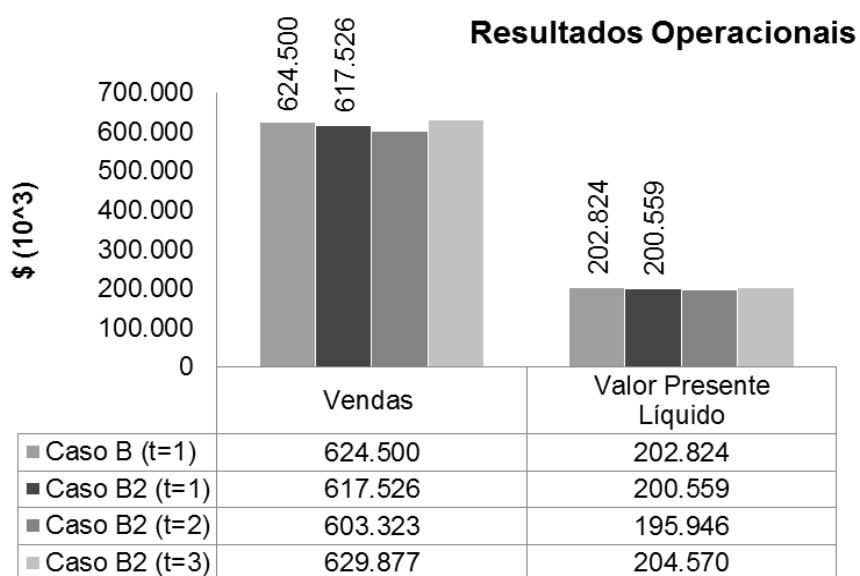


Figura 33: Resultados dos custos do caso B para $t=1$ e caso B2 para $t = 1, 2$ e 3 .

4-Vendas

A inclusão de incertezas na demanda no caso B2 resulta em uma redução das vendas nos mercados consumidores. A redução de 1,12% no resultados das vendas do caso B2 em relação ao caso B em $t=1$ é justificada pelo cenário realista de demanda no nó raiz (R_t) que considera uma variação de demanda negativa de -0,01 ou 1%.

5-Valor Presente Líquido – VPL

A redução no resultado de vendas em B2 em $t=1$ impacta diretamente o resultado do Valor Presente Líquido do período. Uma redução de \$ 2.265 do VPL no caso B2 comparando-se com o resultado do caso B para o mesmo período $t=1$, esta redução possui um peso representativo no fluxo de caixa da empresa.

A partir das análise dos resultados dos custos e operacionais do caso B2 é possível verificar que incertezas na demanda impactam diretamente o resultado da cadeia de suprimentos, uma vez que a quantidade vendida aos mercados consumidores sofre alterações e toda a cadeia irá adaptar-se aos novos volumes de produção, distribuição e compras de insumos e matérias-primas.

A seguir é apresentada a análise de sensibilidade dos resultados do caso B2, com logística reversa e com incertezas a fim de verificar o impacto das variações de demanda (vd) e cenários de probabilidade (pb) inseridas no modelo nos resultados operacionais.

5.10 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO CASO B2

Duas análises diferentes são conduzidas onde são consideradas alterações nos seguintes parâmetros do modelo: probabilidades (pb) de cenários e variação de demanda (vd).

5.10.1 Probabilidade (pb) dos cenários de demanda

A atribuição de probabilidades (pb) para os diferentes cenários envolve alguma subjetividade uma vez que a definição dos valores é realizada de forma aleatória ou arbitrária conforme abordagem de Tsiakis *et al.* (2001), utilizada em Cardoso *et al.* (2013). A fim de analisar o impacto da probabilidade de cada cenário, o modelo do caso B2 foi configurado para diferentes valores de probabilidade (pb) em cada rodada (run), conforme Tabela 33.

Tabela 33: Probabilidade (pb) de cada cenário em cada rodada.

Cenário	Run1	Run2	Run3	Run4	Run5	Run6	Run7
Otimista	0,45	0,40	0,50	0,40	0,45	0,30	0,50
Realista	0,30	0,35	0,25	0,30	0,20	0,35	0,35
Pessimista	0,25	0,25	0,25	0,30	0,35	0,35	0,15

5.10.2 Variação de demanda (vd)

Na Tabela 34, são apresentados os valores das variações de demanda considerados para o caso B2 em cada rodada.

Tabela 34: Variação de demanda de cada cenário em cada rodada.

Cenário	Run1	Run2	Run3	Run4	Run5	Run6	Run7
Otimista	0,5000	0,2500	0,5000	0,1000	0,5000	0,3500	0,1000
Realista	-0,0100	-0,0500	-0,0700	0,0500	0,1000	0,1500	-0,0800
Pessimista	-0,1250	-0,1225	-0,1125	-0,1075	-0,1050	-0,0975	-0,0925

5.10.3 Análise dos resultados com incertezas

A análise de sensibilidade é realizada usando-se os valores atribuídos para o parâmetro vd , o qual caracteriza a variação de demanda para cada nó da árvore de cenários.

A Figura 34 apresenta o resultado do Valor Presente Líquido para cada rodada para o caso B2. As mudanças observadas não causaram impacto significativo no VPL, pois comparando-se o resultado da rodada 1 (177,471 milhões de unidades monetárias) com a rodada 4 (181,020 milhões de unidades monetárias) ocorreu um aumento de 2% e comparando-se o resultado da rodada 7 (184,063 milhões de unidades monetárias) com a rodada 4 (181,020 milhões de unidades monetárias) ocorre decréscimo de 1,65%. Mesmo assim, melhores resultados são adquiridos quando cenários realistas e otimistas possuem maiores probabilidades (pb) e piores resultados em cenários pessimistas de demanda.

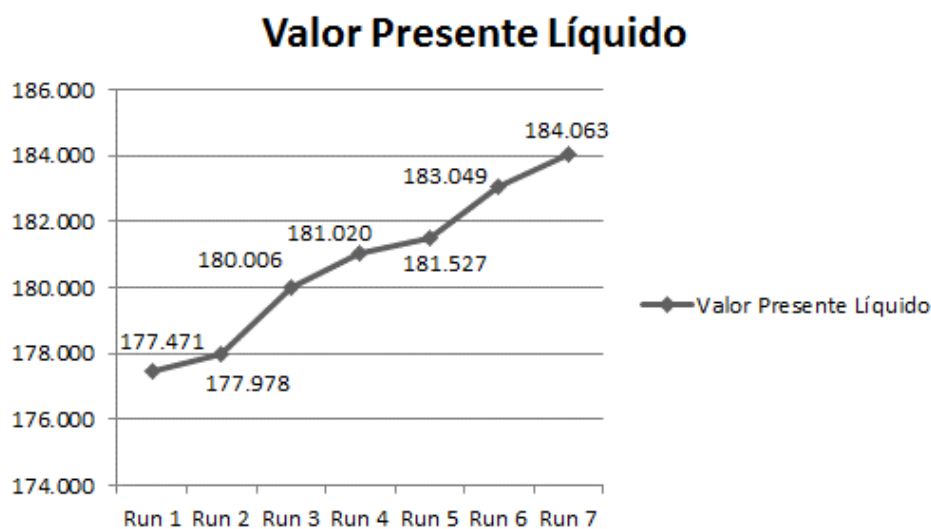


Figura 34: Valor Presente Líquido para cada rodada.

5.11 RESULTADOS DO MODELO DO CASO B3

Após a verificação e análise dos resultados operacionais, dos custos e estoques das diferentes versões do modelo do caso real, o objetivo desta seção é verificar o comportamento dos fluxos de transporte a partir da alteração dos dados de entrada do modelo referente ao estudo de caso B (com logística reversa, sem impostos) que poderiam limitar as decisões de fluxo de produtos. Desta forma, foi criado a versão B3, uma variação do modelo do estudo de caso B.

A seguir são apresentadas as modificações realizadas nos dados de entrada da Tabela de Dados do modelo para a obtenção de uma nova versão do modelo (caso B3). As alterações realizadas foram:

- Alterado para zero valores da Tabela de dados do parâmetro lk , que se refere ao custo de frete do fluxo de transporte de produtos entre as entidades da cadeia;
- Alterado parâmetro de utilização mínima dos processos de tecnologia de produção $i1$ e $i2$ e retrabalho $i3$ e $i4$ pt para 0%;
- Os parâmetros que limitam a quantidade mínima (low) e máxima (up) de produtos que podem ser transferidos entre as entidade da cadeia foram

configurados para os valores 0 (zero) e um valor muito alto, respectivamente, para não haver restrição entre os fluxos. O modelo não realiza otimização de frete.

- As capacidades produtivas das fábricas $f1$ e $f2$ para produção de produtos bons (Q) e retrabalho de produtos não conforme (QNC) e em final de vida útil (QEL) mantiveram-se como nos modelos A e B, ilimitada.

Para a interpretação dos resultados dos fluxos de transporte do caso B, os períodos de tempo t são divididos em três instantes ou momentos de tempo: (i) instante inicial; (ii) instante intermediário e (iii) instante final.

(i) Fluxos de Transporte no instante Inicial de $t=1$

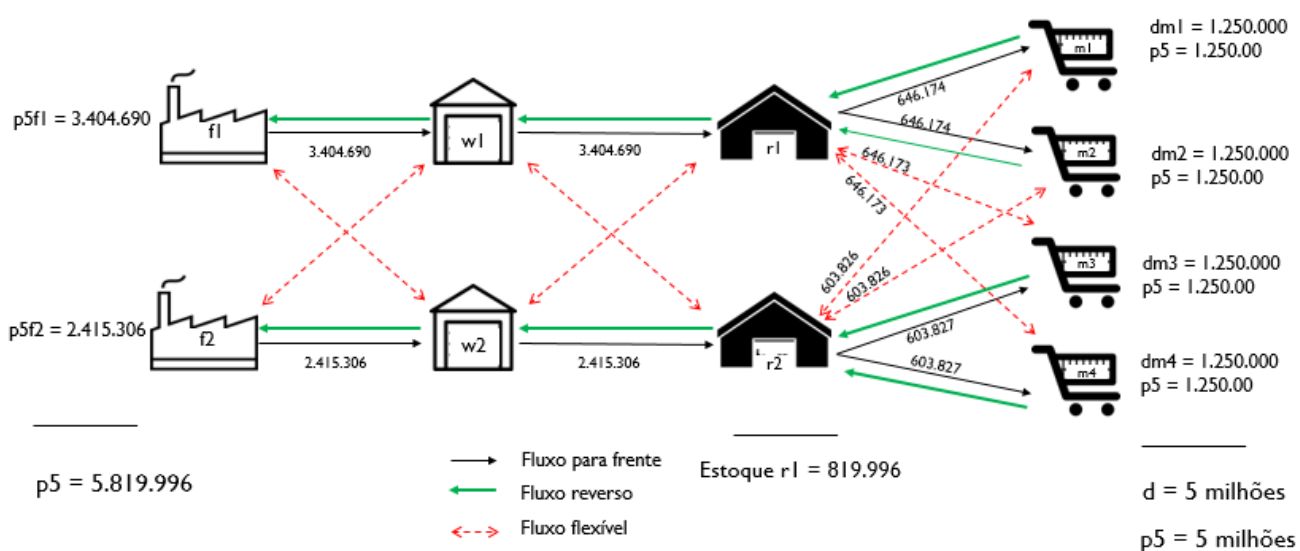
A análise dos resultados é iniciada pelos dados de fluxo de transporte de produtos no sentido direto e reverso estabelecidos entre os nós da cadeia de suprimentos, apresentados na Tabela 35 para o primeiro período de tempo.

É possível verificar que o modelo decide produzir na fábrica $f1$ uma quantidade de 3.404.690 unidades de produto acabado e na fábrica $f2$ a quantidade de 2.415.306 unidades. A decisão de produzir maior volume na fábrica $f1$ é justificado pelo menor custo de produção. O somatório da produção do produto final $p5$ nas fábricas $f1$ e $f2$ totalizam 5.819.996 de unidades, uma quantidade 16% maior que o valor da demanda do período de 5 milhões de unidades. Este volume adicional de 16% é justificado pela otimização do custo de produção para o próximo período de tempo, uma vez que o modelo está configurado para apresentar um aumento de 20% nos custos por período.

Tabela 35: Fluxos de Transporte Caso B3 para $t=1$ (instante inicial).

Pf	v	w	s	t	Q
P5	f1	w1	Rt	1	3.404.690
P5	f2	w2	Rt	1	2.415.306
P5	w1	r1	Rt	1	3.404.690
P5	w2	r2	Rt	1	2.415.306
P5	r1	m3	Rt	1	646.174
P5	r1	m4	Rt	1	646.174
P5	r1	m1	Rt	1	646.173
P5	r1	m2	Rt	1	646.173
P5	r2	m3	Rt	1	603.826
P5	r2	m4	Rt	1	603.826
P5	r2	m1	Rt	1	603.827
P5	r2	m2	Rt	1	603.827

Resultado Caso B3, com logística reversa e fluxos flexíveis, **instante de tempo inicial**, para $t=1$

Figura 35: Fluxos de Transporte do Caso B3 em $t=1$ (instante inicial).

Segue análise das Decisões do Modelo dos fluxos direto:

- Volume de Produção de $p5$: O modelo decide realizar maior volume de produção na fábrica $f1$ uma vez que o custo de produção (Oc) nesta fábrica é menor que

na fábrica $f2$ conforme verificado na Tabela 36. Desta forma, o modelo está otimizando o resultado do Valor Presente Líquido do período.

Tabela 36: Custo de produção para $t=1$.

i	v	t	Oc
i1	f1	1	\$ 8,33
i2	f2	1	\$ 9,44

- Fluxo de Transporte das fábricas $f1$ e $f2$ para os armazéns $w1$ e $w2$: O modelo decide transferir 100% dos estoques produzidos em $f1$ e $f2$ para $w1$ e $w2$. Os custos dos fluxos de transporte (lk) apresentam o mesmo valor.
- Fluxo de Transporte dos armazéns $w1$ e $w2$ para os pontos varejistas $r1$ e $r2$: o modelo decide transferir 100% dos estoques para os pontos varejistas $r1$ e $r2$.
- Fluxo de Transporte para os mercados consumidores $m1$, $m2$, $m3$ e $m4$: O volume estocado nos pontos varejistas $r1$ e $r2$ é 819.996 unidades, o restante do estoque é igualmente dividido e transferido para os quatro mercados consumidores atendendo 100% da demanda destes mercados.

(ii) Fluxos de Transporte no instante intermediário de $t=1$

No instante intermediário de $t=1$ os produtos chegam aos mercados consumidores e são reprovados. Da quantidade de 5 milhões de unidades que as fábricas $f1$ e $f2$ disponibilizam para os clientes são reprovados 175.000 unidades de produtos não conformes (QNC) e 250 mil unidades de produtos em fina de vida útil (QEL), totalizando 425.000 unidades de produtos que retornam à fábrica $f2$ para serem reconicionados, conforme ilustrados na Tabela 37 e Figura 36.

Quando os produtos QNC e QEL chegam na fábrica $f2$ passam por uma seleção para verificar as condições de qualidade necessárias para serem recuperados, caso os produtos reprovem na seleção de qualidade são descartados.

O modelo do caso B considera que 11% dos produtos QNC que chegam na fábrica para serem recuperados são descartados, 19.250 unidades, e 11% dos

produtos QEL, 27.500 unidades. Este valor de 11% é o mesmo utilizado pelo casos Real, a empresa considera estes valores no orçamento anual de descarte.

Após a inspeção, sobram 378.250 unidades aptos para serem reconicionados e retornarem para os mercados consumidores como produtos bons (Q).

Tabela 37: Fluxos de Transporte Caso B3 para $t=1$ (instante intermediário).

Pf	w	v	s	t	QNC
P5	m1	r2	Rt	1	43.750
P5	m2	r2	Rt	1	43.750
P5	m3	r2	Rt	1	43.750
P5	m4	r2	Rt	1	43.750
P5	r2	w2	Rt	1	175.000
P5	w2	f2	Rt	1	175.000

Pf	w	v	s	t	QEL
P5	m1	r2	Rt	1	62.500
P5	m2	r2	Rt	1	62.500
P5	m3	r2	Rt	1	62.500
P5	m4	r2	Rt	1	62.500
P5	r2	w2	Rt	1	250.000
P5	w2	f2	Rt	1	250.000

Pf	v	s	t	dEL	dNC
P5	f2	Rt	1	27.500	19.250

Resultado Caso B3, com logística reversa e fluxos flexíveis instante de tempo intermediário para $t=1$

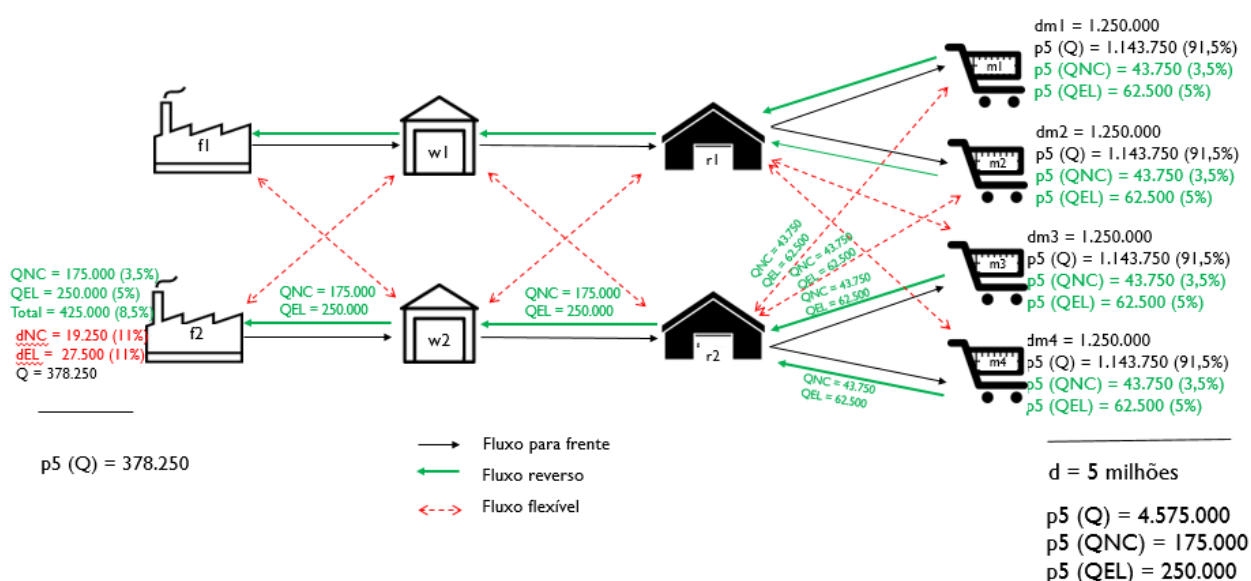


Figura 36: Fluxos de Transporte do Caso B3 em $t=1$ (instante intermediário).

Segue análise das Decisões do Modelo dos fluxos reversos:

- Volume reprovado de produtos não conformes (QNC): O modelo reprovou 3,5% do volume produzido pelas fábricas $f1$ e $f2$ no período.
- Volume reprovado de produtos em final de vida útil (QEL): O modelo reprovou 5,0% do volume produzido por $f1$ e $f2$ no período.

- Fluxo de Transporte Reverso dos mercados consumidores para os pontos varejistas: Os produtos QNC (175.000) e QEL (250.000) devem retornar para retrabalho nos processos de tecnologia $i3$ e $i4$ instalados nas fábricas $f1$ e $f2$. Os custos de retrabalho são iguais em ambas tecnologias das fábricas ($i3$ e $i4$).

Conclui-se que o modelo decidiu concentrar o retrabalho somente na fábrica $f2$ devido a flexibilidade dos fluxos de transporte onde todos mercados consumidores podem devolver os produtos reprovados para qualquer ponto varejista.

Tabela 38: Custo de retrabalho para $t=1$.

i	v	t	Oc
$i3$	$f1$	1	\$ 0,0055
$i4$	$f2$	1	\$ 0,0055

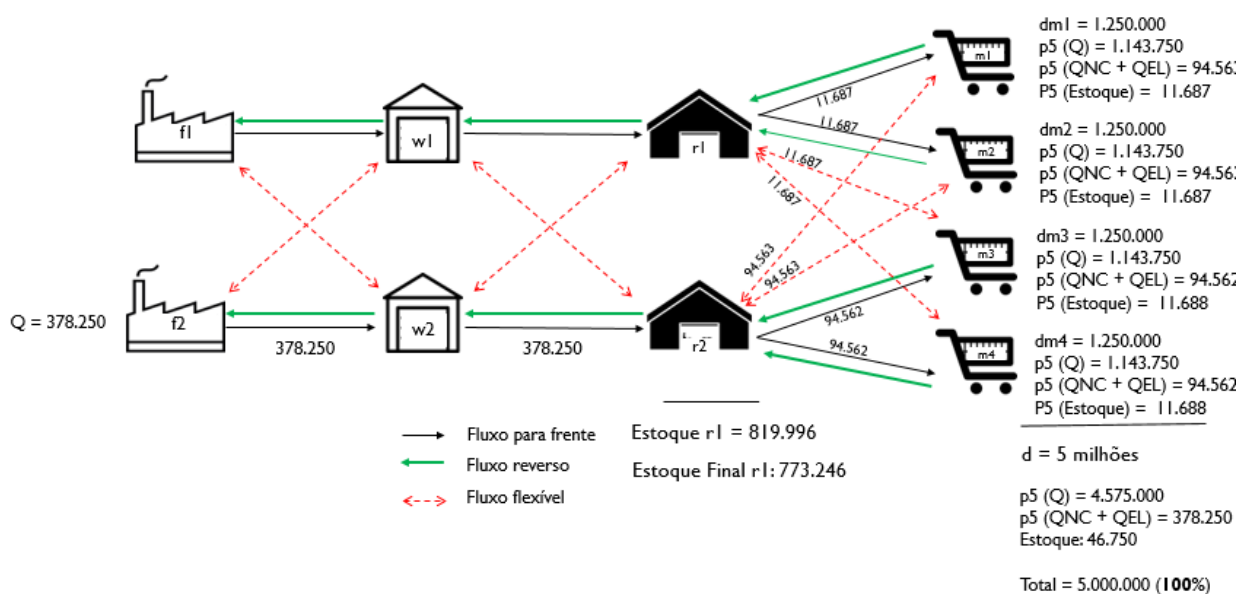
- Fluxo de Transporte Reverso do ponto varejista para o armazém: O modelo decide transferir a quantidade total de produtos QNC e QEL para o armazém $w2$ para que os produtos sejam retrabalhados na tecnologia $i4$ localizada na fábrica $f2$.
- Fluxo de Transporte Reverso do armazém para a tecnologia de retrabalho: os produtos reprovados QNC e QEL são disponibilizados para a tecnologia $i4$ instalada na fábrica $f2$ pelo armazém $w2$.

(iii) Fluxos de Transporte no instante final de $t=1$

Conforme Tabela 39 e Figura 37 no instante final a quantidade de 378.250 unidades de produtos recuperados retornam para os mercados consumidores para complementar o atendimento da demanda do período. Assim, o modelo recupera dos mercados consumidores 378.250 unidades de produtos que seriam descartados pelos clientes.

Tabela 39: Fluxos de Transporte Caso B para $t=1$ (instante final).

Pf	V	w	s	t	Q
P5	f2	w2	Rt	1	378.250
P5	w2	r2	Rt	1	378.250
P5	r2	m3	Rt	1	94.563
P5	r2	m4	Rt	1	94.563
P5	r2	m1	Rt	1	94.562
P5	r2	m2	Rt	1	94.562

Resultado Caso B3, com logística reversa e fluxos flexíveis **instante de tempo final** para $t=1$ Figura 37: Fluxos de Transporte do Caso B3 em $t=1$ (instante final).

É possível verificar que a demanda dos mercados consumidores é atendida 100% pelos pontos varejistas no primeiro período de tempo.

O modelo decide produzir na fábrica $f1$ uma quantidade de 3.404690 unidades de produto acabado e na fábrica $f2$ a quantidade de 2.415.306 de unidades, a quantidade maior é produzida na fábrica $f1$ porque apresenta menor custo de produção do que a fábrica $f2$, conforme comentado anteriormente.

Ainda, é possível verificar que o modelo caso B3 constrói estoque de produtos bons (Q) maior que no caso B. Desta forma, conclui-se que o modelo decidiu realizar uma produção maior que a demanda mínima exigida no modelo para otimizar os custos

de produção dos próximos períodos devido a configuração do modelo que apresenta aumento de 20% dos custos por período. O modelo não concentra toda produção no primeiro período de tempo devido à exigência do giro do estoque (tor) e para não aumentar o nível de estoque médio.

Conclui-se que quando os fluxos de transporte são parametrizados para valores iguais as decisões do modelo estão relacionadas ao menor custo para a cadeia de suprimentos. Resumidamente as decisões do modelo foram:

- Maior volume de produção na fábrica $f1$ que apresenta menor custo operacional referente a tecnologia $i1$;
- Retrabalho de produtos não conformes (QNC) e em final de vida útil (QEL) concentrado na fábrica $f2$, pois o caso B3, devido à flexibilidade dos fluxos, os mercados consumidores $m1$ e $m2$ agora podem enviar produtos para o ponto varejista $r2$, conseqüentemente para o centro de distribuição $w2$ e finalmente para a fábrica $f2$. A ocorrência destes fluxos é proibida no caso B devido ao alto custo tributário associado à operação logística.
- Obtenção de estoque de segurança com a produção de volumes maiores que a demanda dos mercados consumidores sendo possível reação em casos de vendas acima e otimização dos custos de produção dos períodos posteriores;
- Transferência imediata dos estoque de produtos bons (Q) e recuperados (QNC e QEL) para os armazéns e pontos varejistas;
- Atendimento de 100% da demanda solicitada pelos mercados consumidores;

A seguir é apresentado os resultados dos fluxos de transporte para o segundo período de tempo para o cenário realista de demanda realista (RR).

(iv) Fluxos de Transporte no instante inicial de $t=2$

A cada período de tempo a demanda é acrescida 30% do valor do período anterior. Então, para o período de tempo $t=2$ a demanda total dos mercados consumidores é de 6,5 milhões de unidades.

Na Tabela 40 e Figura 38 é possível verificar que o modelo decide produzir 7.565.994 de unidades de produto acabado em cada fábrica f1 e f2. Uma quantidade adicional de 16% da demanda do período justificada pela otimização do custo de produção que irá sofrer aumento de 20% no próximo período.

Tabela 40: Fluxos de Transporte Caso B3 para $t=2$ (instante inicial).

Pf	v	w	s	t	Q
P5	f1	w1	R	2	4.388.276
P5	f2	w2	R	2	3.177.718
P5	w1	r1	R	2	4.388.276
P5	w2	r2	R	2	3.177.718
P5	r1	m3	R	2	830.570
P5	r1	m4	R	2	830.570
P5	r1	m1	R	2	830.571
P5	r1	m2	R	2	830.571
P5	r2	m3	R	2	794.430
P5	r2	m4	R	2	794.430
P5	r2	m1	R	2	794.429
P5	r2	m2	R	2	794.429

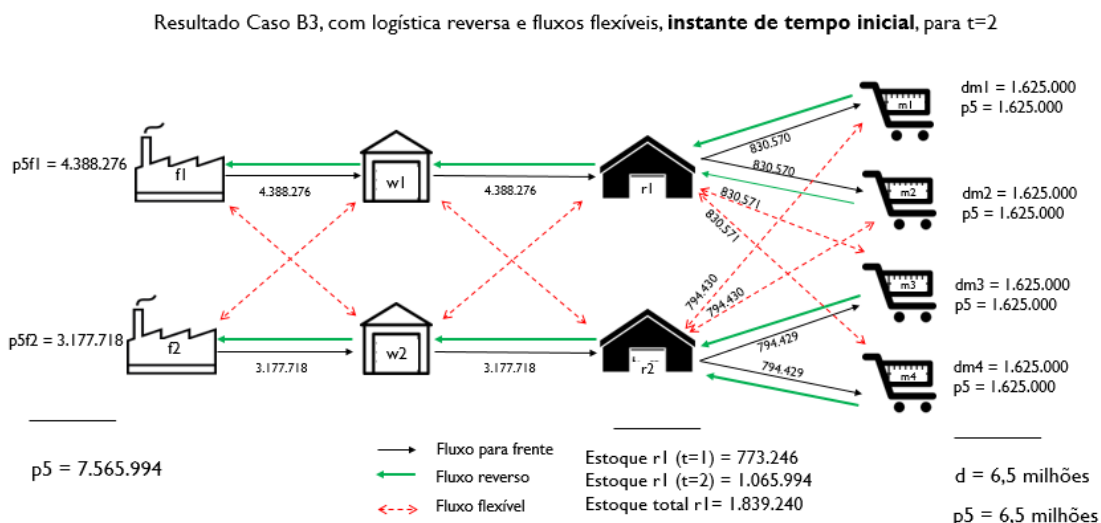


Figura 38: Fluxos de Transporte do Caso B3 em $t=2$ (instante inicial).

(v) Fluxos de Transporte no instante intermediário de $t=2$

No instante intermediário de $t=2$, os produtos chegam aos mercados consumidores e são reprovados. Da quantidade de 7.565.994 de unidades que as fábricas $f1$ e $f2$ disponibilizam para os clientes são reprovados 227.500 unidades de produtos não conformes (QNC) e 325.000 unidades de produtos em fina de vida útil (QEL), totalizando 552.500 unidades de produtos que retornam às fábricas para serem reconicionados conforme ilustrado na Tabela 41 e Figura 39.

Quando os produtos QNC e QEL chegam nas fábricas passam pela seleção de qualidade. Neste momento o modelo descarta 25.025 unidades (11%) de produtos QNC e 35.750 unidades (11%) de produtos QEL. Após a inspeção, sobram 491.725 unidades aptos para serem reconicionados e retornarem para os mercados consumidores.

Tabela 41: Fluxos de Transporte Caso B3 para $t=2$ (instante intermediário).

Pf	w	v	s	t	QNC
P5	m1	r2	R	2	56.875
P5	m2	r2	R	2	56.875
P5	m3	r2	R	2	56.875
P5	m4	r2	R	2	56.875
P5	r2	w2	R	2	227.500
P5	w2	f2	R	2	227.500

Pf	w	v	s	t	QEL
P5	m1	r2	R	2	81.250
P5	m2	r2	R	2	81.250
P5	m3	r2	R	2	81.250
P5	m4	r2	R	2	81.250
P5	r2	w2	R	2	325.000
P5	w2	f2	R	2	325.000

Pf	v	s	t	dEL	dNC
P5	f2	R	2	35.750	25.025

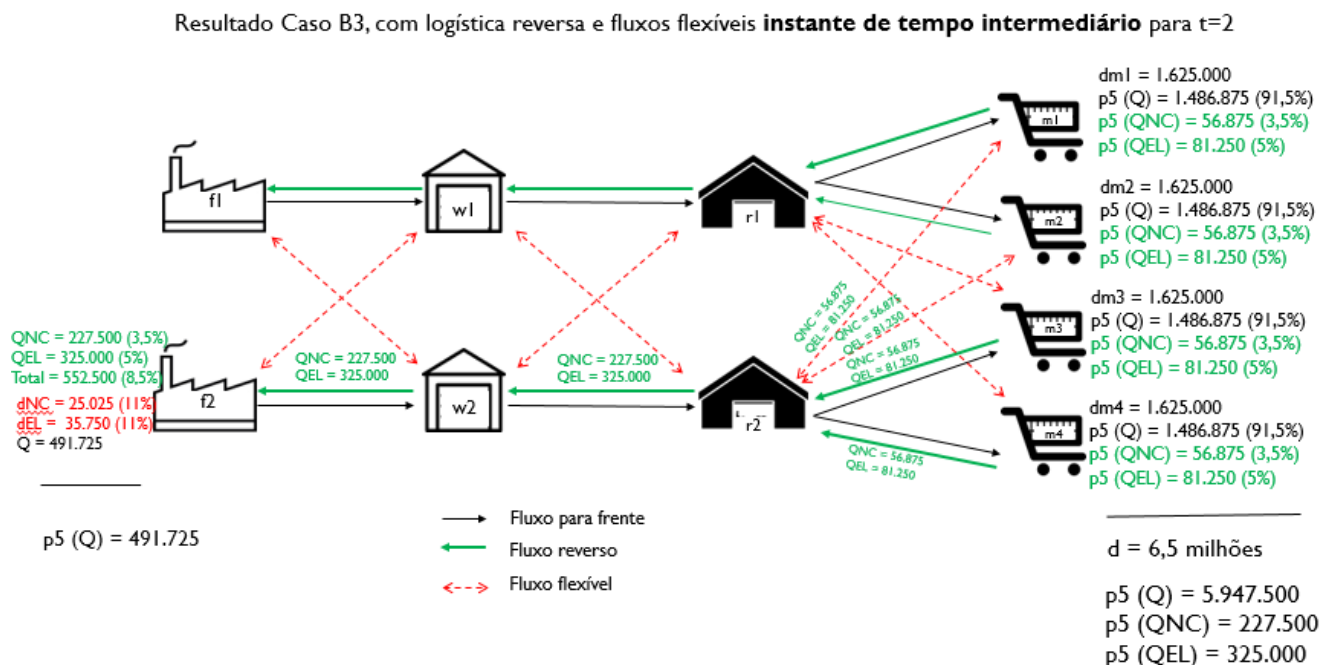


Figura 39: Fluxos de Transporte do Caso B3 em $t=2$ (instante intermediário).

(vi) Fluxos de Transporte no instante final de $t=2$

Conforme Tabela 42 e Figura 40 no instante final a quantidade de 491.725 unidades de produtos recuperados retornam para os mercados consumidores para complementar o atendimento da demanda do período.

Tabela 42: Fluxos de Transporte Caso B para $t=2$ (instante final).

Pf	V	w	s	t	Q
P5	f2	w2	R	2	491.725
P5	w2	r2	R	2	491.725
P5	r2	m3	R	2	122.932
P5	r2	m4	R	2	122.931
P5	r2	m1	R	2	122.931
P5	r2	m2	R	2	122.931

Resultado Caso B3 com logística reversa e fluxos flexíveis **instante de tempo final** para $t=2$

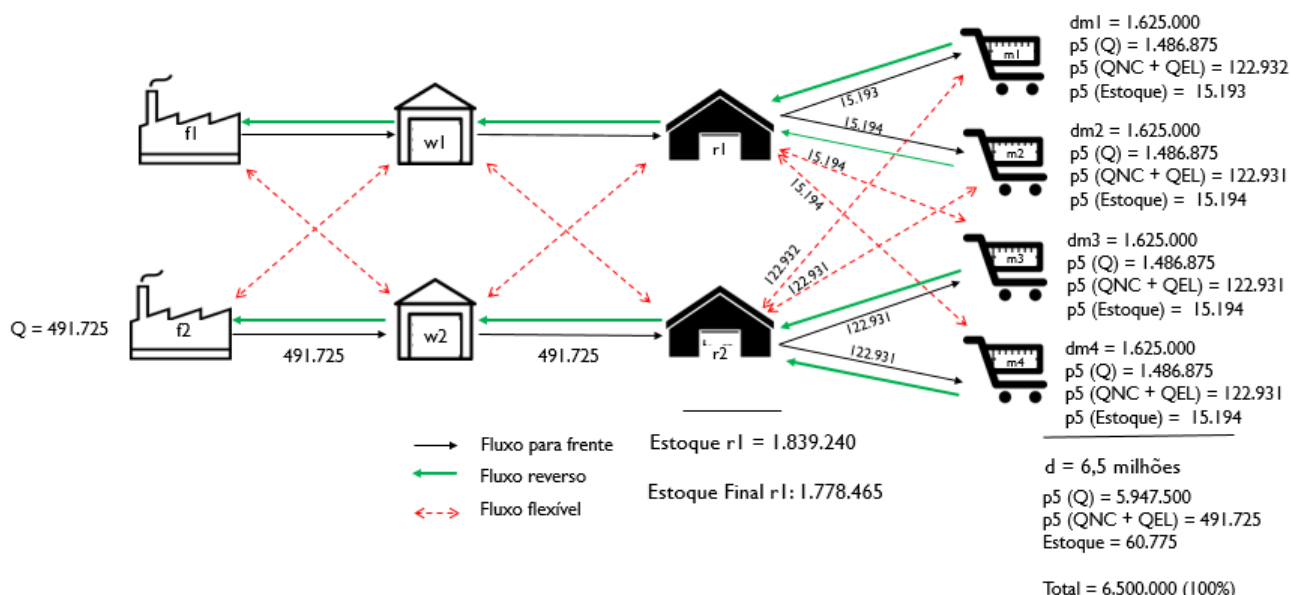


Figura 40: Fluxos de Transporte do Caso B3 em $t=2$ (instante final).

Para o segundo período de tempo ($t=2$), a demanda dos mercados consumidores é atendida por 5.947.500 unidades de produtos Q, 491.725 unidades de produtos QNC e QEL recuperados, totalizando a quantidade de 6.500 de unidades. Desta forma, é possível verificar que a demanda dos mercados consumidores é atendida 100% pelos pontos varejistas no período de tempo $t=2$ e que o ponto varejista r1 constrói estoque de 1.778.465.

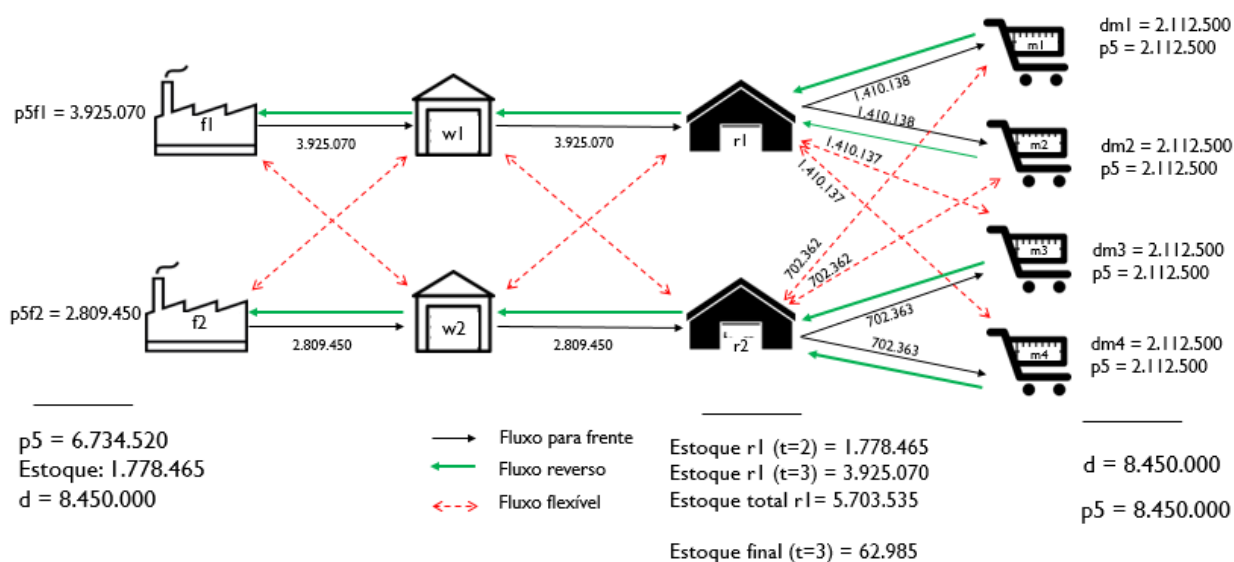
(vii) Fluxos de Transporte no instante Inicial de $t=3$

Na Tabela 43 e Figura 41 é possível verificar que o modelo decide produzir na fábrica f1 uma quantidade de 3.925.070 de unidades de produto acabado e na fábrica f2 a mesma quantidade de 2.809.450 de unidades. O somatório da produção do produto final p5 nas fábricas f1 e f2 totalizam 6.734.520 de unidades, menor que a demanda do período, uma vez que o modelo possui estoque no ponto varejista r1 de 1.778.465 de unidades nos períodos anteriores.

Tabela 43: Fluxos de Transporte Caso B3 para $t=3$ (instante inicial).

Pf	v	w	s	t	Q
P5	f1	w1	RR	2	3.925.070
P5	f2	w2	RR	2	2.809.450
P5	w1	r1	RR	2	3.925.070
P5	w2	r2	RR	2	2.809.450
P5	r1	m3	RR	2	1.410.138
P5	r1	m4	RR	2	1.410.138
P5	r1	m1	RR	2	1.410.138
P5	r1	m2	RR	2	1.410.138
P5	r2	m3	RR	2	702.362
P5	r2	m4	RR	2	702.362
P5	r2	m1	RR	2	702.362
P5	r2	m2	RR	2	702.362

Resultado Caso B3, com logística reversa e fluxos flexíveis, **instante de tempo inicial**, para $t=3$

Figura 41: Fluxos de Transporte do Caso B3 em $t=3$ (instante inicial).(viii) Fluxos de Transporte no instante intermediário de $t=3$

No instante intermediário de $t=3$ os produtos chegam aos mercados consumidores e são reprovados. Da quantidade de 6.734.520 de unidades que as fábricas f1 e f2 disponibilizam para os clientes são reprovados 295.748 unidades de

produtos não conformes (QNC) e 422.500 unidades de produtos em fina de vida útil (QEL), totalizando 718.248 unidades de produtos que retornam às fábricas para serem reconicionados, conforme ilustrados na Tabela 44 e Figura 42.

Quando os produtos QNC e QEL chegam nas fábricas passam pela inspeção de qualidade, onde são descartados 32.533 unidades (11%) de produtos QNC e 46.475 unidades (11%) de produtos QEL. Após a inspeção, sobram 639.240 unidades aptos para serem reconicionados e retornarem para os mercados consumidores.

Tabela 44: Fluxos de Transporte Caso B3 para $t=3$ (instante intermediário).

Pf	w	v	s	t	QNC
P5	m1	r2	RR	2	73.937
P5	m2	r2	RR	2	73.937
P5	m3	r2	RR	2	73.937
P5	m4	r2	RR	2	73.937
P5	r2	w2	RR	2	295.748
P5	w2	f2	RR	2	295.748

Pf	w	v	s	t	QEL
P5	m1	r2	RR	2	105.625
P5	m2	r2	RR	2	105.625
P5	m3	r2	RR	2	105.625
P5	m4	r2	RR	2	105.625
P5	r2	w2	RR	2	422.500
P5	w2	f2	RR	2	422.500

Pf	v	s	t	dEL	dNC
P5	f2	RR	2	46.475	32.533

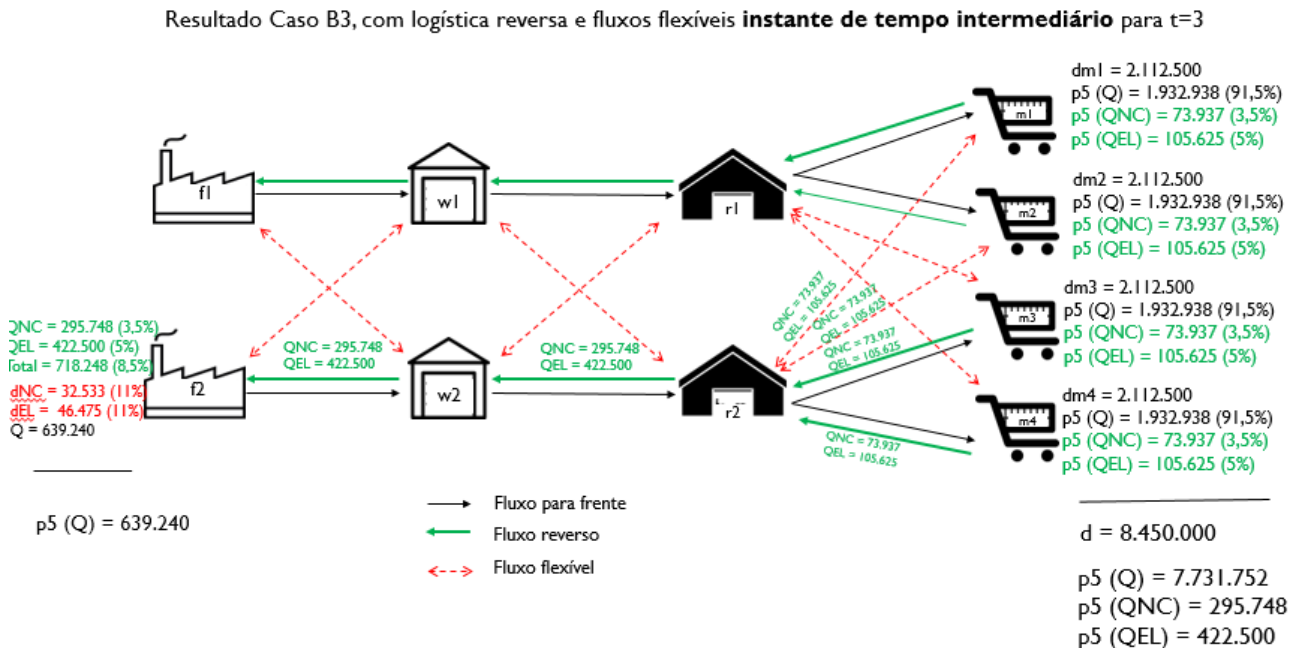


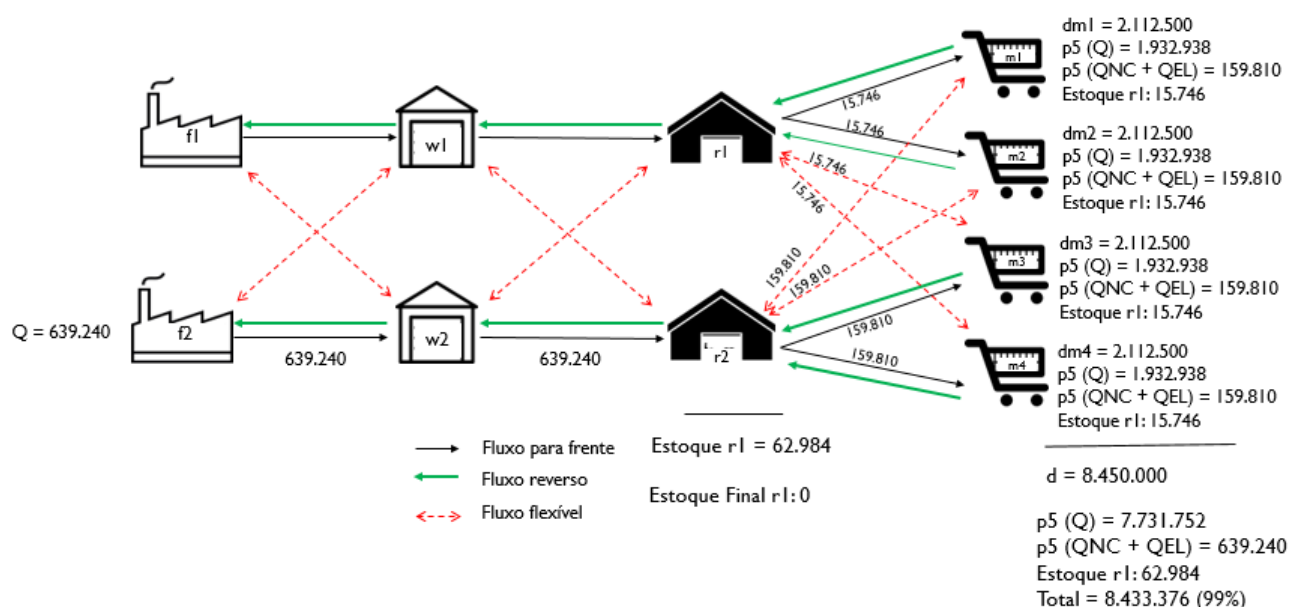
Figura 42: Fluxos de Transporte do Caso B3 em $t=3$ (instante intermediário).

(ix) Fluxos de Transporte no instante final de $t=3$

Conforme Tabela 45 e Figura 43 no instante final a quantidade de 639.240 unidades de produtos recuperados retornam para os mercados consumidores para complementar o atendimento da demanda de 8,450 milhões de unidades do período. Assim, o modelo recupera dos mercados consumidores 639.240 unidades de produtos que seriam descartados pelos clientes.

Tabela 45: Fluxos de Transporte Caso B3 para $t=3$ (instante final).

Pf	V	w	s	t	Q
P5	f2	w2	RR	2	639.240
P5	w2	r2	RR	2	639.240
P5	r1	m3	RR	2	15.746
P5	r1	m4	RR	2	15.746
P5	r1	m1	RR	2	15.746
P5	r1	m2	RR	2	15.746
P5	r2	m3	RR	2	159.810
P5	r2	m4	RR	2	159.810
P5	r2	m1	RR	2	159.810
P5	r2	m2	RR	2	159.810

Resultado Caso B3, com logística reversa e fluxos flexíveis **instante de tempo final** para $t=3$ Figura 43: Fluxos de Transporte do Caso B3 em $t=3$ (instante final).

Logo, para o terceiro período de tempo ($t=3$), a demanda dos mercados consumidores é atendida por 7.731.752 unidades de produtos Q (sendo que 1.715.480 enviadas pelo estoque do ponto varejista r1), 639.240 unidades de produtos QNC e QEL recuperados e mais 62.984 unidades do estoque de r1 para reposição da quantidade descartada no período, totalizando a quantidade de 8.433.376 de unidades. Desta forma, é possível verificar que a demanda dos mercados consumidores é atendida 99% pelos pontos varejistas no período de tempo $t=3$.

A seguir é realizada a análise dos resultados do caso B3, disponíveis nas Figuras 44 e 45, configurado para maior flexibilidade dos fluxos de transporte a fim de avaliar as decisões do modelo e o impacto nos resultados operacionais da cadeia.

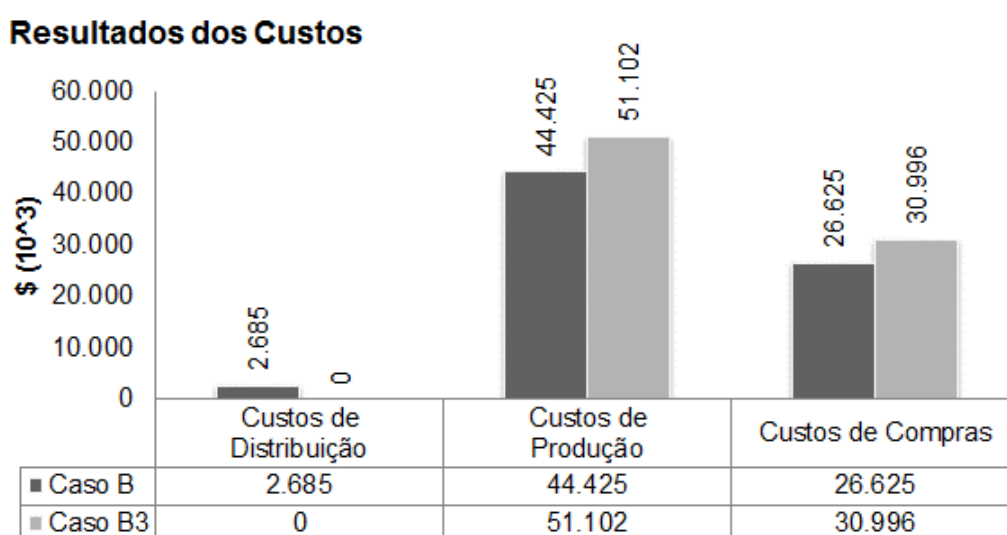


Figura 44: Resultados dos Custos dos Casos B e B3 para $t=1$.

1-Custos de Distribuição

Os dados de entrada de lk (custo de transporte) foram considerados zero. Portanto, o resultado do custo de distribuição da cadeia é zero.

2-Custos de Produção

Mesmo com a decisão do modelo do Caso B3 de produzir o maior volume de produtos bons (Q) na fábrica de menor custo operacional $f1$, o resultado dos custos de produção do período $t=1$ do Caso B3 apresentou aumento de 15% em relação ao resultado do modelo B. Este aumento ocorre devido a quantidade produzida para construção de estoque de segurança.

3-Custo de Compras

Como a quantidade de produtos bons Q está relacionada com a quantidade de produtos p5 produzida, o aumento no volume de produção de 765.580 unidades no Caso B3 de produtos p5 em relação ao caso B justifica o aumento de 16% do Custo de Compras do período $t=1$.

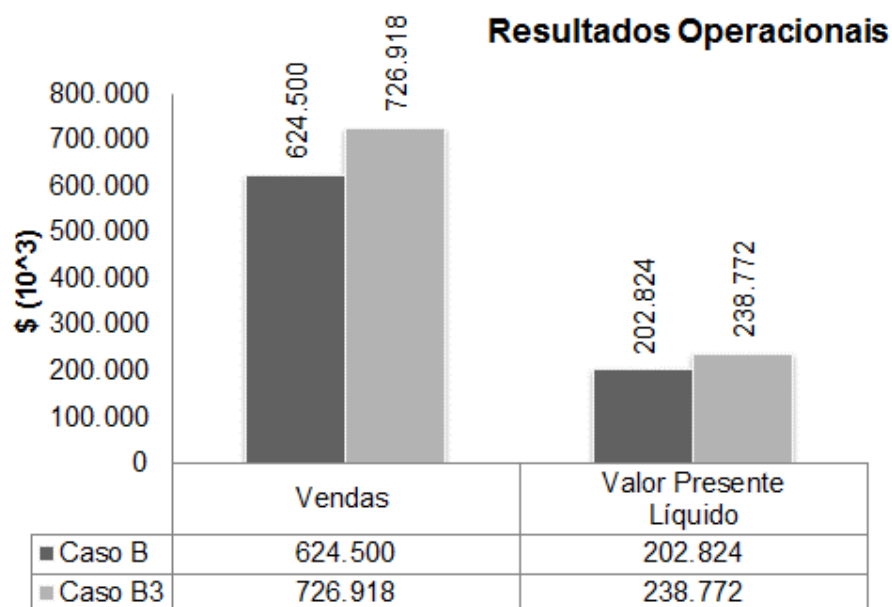


Figura 45: Resultados Operacionais dos Casos B e B3 para $t=1$.

4-Resultado de Vendas

Com o aumento do volume de produção de 765.580 unidades no Caso B3 em relação ao Caso B para obtenção de estoque de segurança, a cadeia disponibilizou uma quantidade maior para os clientes, 6,5% maior que a demanda do período de 5 milhões de unidades. A partir disso, conclui-se que o modelo é capaz de reagir num cenário de vendas acima.

5-Resultado do Valor Presente Líquido

O Valor Presente Líquido acompanhou o aumento das vendas com a disponibilidade de estoque adicional produzido nas fábricas de 765.580 unidades e disponibilizado aos mercados consumidores. O resultado do VPL para o caso B3 de 238,772 milhões de unidades monetárias foi 17,7% maior que o resultado do Caso B

para o mesmo período. Este resultado é potencializado pela ausência dos débitos dos custos de distribuição.

A partir da análise dos resultados do Modelo do Caso B3 foi possível verificar que se não existissem restrições de regras tributárias no sistema logística brasileiro a cadeia de suprimentos conseguiria organizar-se para otimizar os seguintes fatores listados abaixo:

- (i) Os Custos de Produção foram otimizados a partir da definição de maiores lotes de produção alocados na fábrica $f1$ que apresenta menor custo operacional;
- (ii) Armazenagem equilibrada entre os dois centros de distribuição $w1$ e $w2$ a fim de dividir o fluxo logístico de mercadorias entre os armazéns para reduzir o custo com armazenagem externa e ocupação de posições pallets;
- (iii) Definição do local de retrabalho em $i4$ localizada em $f2$ a fim de concentrar a operação logística de retorno dos produtos reprovados, sendo possível a partir da flexibilidade dos fluxos onde os quatro mercados consumidores podem devolver produtos para os dois pontos varejistas;
- (iv) Sem as regras tributárias o fluxo de transporte poderia ser otimizada na escolha de *transit-times* menores, sem preocupar-se com manobras fiscais que impactam o valor presente líquido da cadeia.

5.12 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os resultados para as diferentes modelos e configurações da cadeia de suprimentos propostos no Capítulo 4.

Na Seção 5.1 são apresentadas as configurações dos casos do modelo.

Na Seção 5.2 analisam-se os resultados do modelo do caso determinístico A e B, sem e com logística reversa. Comparam-se os resultados do modelo de custos, vendas e Valor Presente Líquido do primeiro período de tempo ($t=1$) com os resultados reais da empresa. O aumento na complexidade do modelo pela introdução do fluxo

reverso e novos fluxos de transporte entre as entidades levam para um aumento de variáveis e restrições.

Na Seção 5.3 são analisados os fluxos de transporte de produtos bons (Q) no sentido direto da cadeia e os fluxos reversos de produtos não conformes (QNC) e em final de vida útil (QEL) que retornam dos mercados consumidores e são recuperados para retornarem aos clientes. Logo em seguida são avaliados os níveis de estoque de produtos em cada entidade de armazenagem do conjunto Vz (*warehouses* e *retailers*) para os períodos de tempo 1, 2 e 3. Os resultados de níveis de estoque são importantes para análise de ocupação do espaço de armazenagem em cada entidade. Estas informações apoiam tomadas de decisão para escolha de expansão do depósito que estoca maior volume de produtos da cadeia de suprimentos. Neste trabalho, devido à alta capacidade inicial de armazenagem (*is*) configurada nos modelos dos casos A e B não houve necessidade de investimento para expansão.

Na Seção 5.4 foram realizados os cálculos dos novos preços de produção do produto final p5 para que o modelo opere com os custos da carga tributária brasileira. Após a obtenção dos novos custos de produção de p5 na fábrica f1, foram alterados os valores de custos de produção (*Oc*) para todos os períodos de tempo na Tabela de Dados do Estudo de Caso.

Na Seção 5.5 apresenta-se a análise dos resultados dos casos A e A1, sem logística reversa ilustrados nas Figuras 23 e 24, para dois cenários distintos: sem custos tributários; com custos tributários. Os custos de distribuição do caso A sem impostos e com impostos mantêm-se os mesmos. O aumento dos custos no caso com impostos é verificado devido ao adicional da carga tributária incluído no custo unitário do produto final p5 em f1 e f2. Também ocorre aumento dos custos de produção do produto final p5 no primeiro período de tempo ($t=1$), na fábrica f1 devido ao benefício do Programa Desenvolve para o estado da Bahia

Na Seção 5.6 foi realizada a verificação dos resultados do caso B e B1 com logística reversa sem e com impostos a fim de avaliar o impacto da carga tributária nos resultados da cadeia. Assim como os custos de distribuição do caso A, os custos do caso B sem impostos e com impostos mantêm-se os mesmos, pelo motivo de que os dados do parâmetro *lk* que define o resultado dos custos de transporte do fluxo de materiais foi mantido o mesmo no caso com e sem carga tributária. Os custos de produção aumentam devido a carga tributária introduzida no modelo. Demais custos

sofrem as alterações devido a carga tributária semelhante a análise do caso A. Os resultados do fluxo de saída de produtos bons (Q) dos processos de tecnologia (Out) e processos de retrabalho (Outd) das fábricas f1 e f2 não variaram entre os casos A e B sem impostos e casos A1 e B1 com impostos. Desta forma, não ocorreu alteração no *mix* de produção entre as plantas f1 e f2 porque o projeto do modelo considera apenas um único produto acabado p5.

Na Seção 5.7 é apresentado o cálculo do custo de oportunidade para o estudo de Caso B1, com logística reversa, para a fábrica f2 que é beneficiada pelo incentivo de desoneração fiscal. É realizada a análise dos resultados do custo de oportunidade. Conforme flexibilidade do benefício fiscal que estende o prazo para pagamento da alíquota de ICMS em até 72 meses, o valor dos impostos não pagos apresentarem rendimentos, conforme taxa CDI, do total de aproximadamente 12 milhões de unidades monetárias. Reforçando, este valor refere-se somente aos lucros dos rendimentos da desoneração do imposto. Este benefício colabora diretamente para o aumento do fluxo de caixa do período (CF), conseqüentemente trazendo mais receita (Valor Presente Líquido) em curtíssimo prazo para a empresa.

Na Seção 5.8 é apresentada a análise dos resultados do custo de oportunidade da desoneração fiscal comparativamente com os custos de distribuição para cadeia operar com atividades de logística reversa. A partir dos resultados, é possível verificar que o ganho com custo de oportunidade para o primeiro período de tempo compensa os custos logísticos de distribuição para operar logística reversa e ainda há uma sobra dos rendimentos do período. Este valor pode ser utilizado como limitador para investimentos em logística reversa. Esta análise é interessante para tomada de decisão de investimentos para o processo de recuperação de produtos defeituosos do mercado. Sendo possível adicionar uma nova restrição no modelo que limite a quantidade de produtos que devem retornar aos centros de retrabalho sem impactar os resultados do Valor Presente Líquido do período.

Na Seção 5.9 são verificados os resultados para os casos A, sem logística reversa e B, com logística reversa com três diferentes cenários de demanda (Otimista, Realista e Pessimista) em cada período de tempo. A inclusão de incertezas (Caso B2) resulta em uma redução do Valor Presente Líquido. Isto ocorre devido à redução com Vendas, a qual possui um peso representativo no cálculo do VPL com o cenário de probabilidade. Os custos de distribuição no caso B2 são maiores que os custos do caso

B. Já os custos de produção e compras sofrem uma redução devido às variações de probabilidade inseridas na cadeia.

Na Seção 5.10 são apresentadas duas análises de sensibilidade diferentes onde são consideradas alterações nos seguintes parâmetros do modelo: probabilidades de cenários (pb) e variação de demanda (vd). Melhores resultados são obtidos quando cenários realistas e otimistas possuem maiores probabilidades. Os custos de distribuição são mais sensíveis com a flutuação da demanda refletida no valor das vendas porque o modelo está com nível de atendimento de 100%. Na rodada 5 há um aumento de vendas que implica em aumento nos custos de distribuição do período. Por outro lado, quando as vendas diminuem todos os resultados decrescem. Quando as vendas aumentam, os custos de distribuição também aumentam, mas numa proporção diferente. Com esta análise de sensibilidade, pode-se concluir que o projeto da cadeia de suprimentos é bastante robusto. Não foi realizada alterações na quantidade de entidades da estrutura da cadeia porque os parâmetros atuais de capacidade de fabricação e armazenagem são muito grandes.

Na seção 5.11 são apresentados os resultados para o Caso B3 a fim de verificar o comportamento dos fluxos de transporte e estoques a partir da alteração dos dados de entrada dos parâmetros do modelo referente ao estudo de caso B, com logística reversa, sem impostos que limitam as decisões do modelo para verificar as decisões de produção e estoques que o modelo de otimização tomou. A partir dos resultados do modelo foi possível verificar diferentes decisões como escolha de maior volume de produção na fábrica de menor custo, retrabalho de produtos não conformes na tecnologia instalada na fábrica com maior capacidade produtiva ociosa e construção de estoque de segurança.

6 CONCLUSÃO

A obtenção de um modelo de otimização de uma cadeia que integre atividades do fluxo direto de produção, armazenagem e distribuição com a as atividades de logística reversa como desmontagem, remanufaturamento, recondicionamento e o fluxo reverso de armazenagem e distribuição e que considera incertezas na demanda e o conjunto de regras tributárias que operam no país é um desafio.

O presente trabalho teve como foco o desenvolvimento de um modelo matemático utilizando Programação Linear Inteira Mista adaptado de Cardoso *et al.* (2013) a fim de otimizar o Valor Presente Líquido de uma cadeia de suprimentos, a qual opera com logística reversa, incertezas na demanda e com regras tributárias. O trabalho contribuiu com a contextualização do assunto carga tributária e cadeia de suprimentos e com a construção de um modelo de otimização que opera sob a legislação fiscal brasileira verificando-se os impactos e benefícios das regras tributárias. Algumas equações foram adaptadas do modelo de Cardoso *et al.* (2013) por não representarem a estrutura da cadeia de suprimentos brasileira que atua com logística reversa dos produtos do mercado consumidor até as fábricas e regras tributárias que diferencial a dinâmica da cadeia dos autores.

Foi apresentada a estrutura da cadeia de suprimentos formada por duas fábricas, dois centros de distribuição, dois pontos varejistas e quatro mercados consumidores, fluxos de transporte direto e reverso existentes na rede que definem a movimentação de produtos entre as entidades, os cenários de incertezas na demanda realista, pessimista e otimista que são definidos pelas probabilidades de ocorrência de cada nó da árvore de cenários e as restrições operacionais de produção, armazenagem e distribuição. Foram apresentadas também as regras tributárias que a cadeia está submetida nos estados da Bahia e Paraná onde estão localizadas as duas fábricas. Apresentou-se a formulação matemática do modelo, bem como a função objetivo e as restrições que o definem. São utilizados dois modelos adaptados de Cardoso *et al.* (2013), casos A e B, sem e com logística reversa, respectivamente, e quatro configurações: caso A1, sem logística reversa, com impostos; caso B1, com

logística reversa, com impostos; caso B2, com logística reversa, com incertezas; e caso B3, com logística reversa e com fluxos de transporte flexíveis.

A análise dos resultados operacionais do modelo dos casos A e B adaptados de Cardoso *et al.* (2013) e do caso real, permitiram concluir que o modelo representa adequadamente a cadeia de suprimentos do estudo de caso.

A análise da carga tributária brasileira foi realizada considerando seu impacto nos custos de produção. Os resultados mostraram que o resultado do VPL dos casos A1 e B1 diminuem quando é adicionado a carga tributária. Os custos de distribuição dos casos A e A1, sem impostos e com impostos, respectivamente, mantêm-se os mesmos. O aumento dos custos de produção no caso com impostos é verificado devido ao adicional da carga tributária incluído no custo unitário do produto final p5 em f1 e f2. Assim como os custos de distribuição do caso A, os custos dos casos B e B1 sem impostos e com impostos mantêm-se os mesmos, pelo motivo de que os dados do parâmetro lk que define o resultado dos custos de transporte do fluxo de materiais foi mantido o mesmo no caso com e sem carga tributária.

A conclusão dos resultados com a carga tributária é de que a operação da cadeia concentre suas atividades no estado da Bahia, para a fábrica f2 que é beneficiada pelo incentivo de desoneração fiscal. Para o custo de oportunidade, conforme flexibilidade do benefício fiscal que estende o prazo para pagamento da alíquota de ICMS em até 72 meses, o valor dos impostos não pagos apresentaram rendimentos, conforme taxa CDI, do total de aproximadamente 12 milhões de unidades monetárias. Reforçando, este valor refere-se somente aos lucros dos rendimentos da desoneração do imposto. Este benefício colabora diretamente para o aumento do fluxo de caixa do período (CF), conseqüentemente trazendo mais receita (Valor Presente Líquido) em curtíssimo prazo para a empresa.

A partir dos resultados da desoneração fiscal, conclui-se que o ganho com custo de oportunidade para o primeiro período de tempo compensa os custos logísticos de distribuição para a cadeia operar com logística reversa e ainda há uma sobra dos rendimentos do período. Este valor pode ser utilizado como limitador para investimentos em logística reversa. Esta análise é interessante para tomada de decisão de investimentos para o processo de recuperação de produtos defeituosos do mercado. Sendo possível adicionar uma nova restrição no modelo que limite a quantidade de

produtos que devem retornar aos centros de retrabalho, sem impactar os resultados do Valor Presente Líquido do período.

A inclusão de incertezas na demanda (Caso B2), representadas por demandas otimista, realista e pessimista, resulta em uma redução do Valor Presente Líquido. Nota-se ainda que o nível de atendimento no caso B2, com incertezas, caiu 1% comparando-se com o resultado do Caso B, sem incertezas. A partir das análises dos resultados dos custos e operacionais do caso B2 foi possível verificar que incertezas na demanda impactam diretamente o resultado da cadeia de suprimentos, uma vez que a quantidade vendida aos mercados consumidores sofre alterações toda a cadeia irá adaptar-se aos novos volumes de produção, distribuição e compras de insumos e matérias-primas.

Além disso, duas análises de sensibilidade diferentes foram consideradas: variação nas probabilidades dos cenários (pb) e variação na demanda (vd). Os custos de distribuição são mais sensíveis com a flutuação da demanda refletida no valor das vendas porque o modelo está com nível de atendimento de 90%. Quando as vendas aumentam, os custos de distribuição também aumentam, mas numa proporção diferente.

Por fim, são apresentados os resultados para o caso B3 a fim de verificar o comportamento dos fluxos de transporte e estoques a partir da alteração dos dados de entrada dos parâmetros do modelo referente ao estudo de caso B, com logística reversa, sem impostos que limitam as decisões dos fluxos de transporte. A partir dos resultados foi possível verificar diferentes decisões, como: escolha de maior volume de produção na fábrica de menor custo, retrabalho de produtos não conformes concentrado na tecnologia instalada numa única fábrica e construção de estoque para os períodos posteriores. O modelo decide produzir na fábrica *f1* uma quantidade de 3.404.690 unidades de produto acabado e na fábrica *f2* a quantidade de 2.415.306 de unidades, a quantidade maior é produzida na fábrica *f1* porque apresenta menor custo de produção do que a fábrica *f2*. Ainda, é possível verificar que o modelo caso B3 constrói estoque de produtos bons (Q) maior que no caso B. Desta forma, conclui-se que o modelo decidiu realizar uma produção maior que a demanda mínima exigida no modelo para otimizar os custos de produção dos próximos períodos devido a configuração do modelo que apresenta aumento de 20% dos custos por período. O modelo não concentra toda produção no primeiro período de tempo devido à exigência

do giro do estoque (tor) e para não aumentar o nível de estoque médio. Desta forma, conclui-se que quando os fluxos de transporte são parametrizados para valores iguais as decisões do modelo estão relacionadas ao menor custo para a cadeia de suprimentos

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalho futuro, uma melhoria da formulação do modelo e uma generalização da representação do problema e regras tributárias devem ser exploradas.

Levando em consideração a pressão que as indústrias vêm recebendo da sociedade sobre cadeias de suprimento que operem com sustentabilidade e ecoeficiência, adicionar questões de otimização de frete e das atividades de logística reversa torna-se também uma prioridade.

Atualmente, o *Supply Chain Guru Software* da *LLamasoft Supply Chain Optimization* oferece soluções em projetos de otimização de cadeias de suprimentos que operam com estas características. Compreender a modelagem do projeto da cadeia que este *software* utiliza para as questões de logística reversa, incertezas na demanda e regras tributárias pode contribuir para o aperfeiçoamento da formulação matemática atual, a fim de melhorar a modelagem da malha tributária Industrial Brasileira (ICMS, IPI e COFINS) para toda a cadeia (Fábricas, Centros de Distribuição e *Retailers*).

Novas regras tributárias do Governo Federal surgem constantemente. Logo, incluir no próprio modelo as equações desenvolvidas das regras tributárias e novas lógicas de carga fiscal a fim de capturar os benefícios disponibilizados pelo governo para alcançar resultados operacionais melhores motivam a continuidade dos estudos no projeto de cadeias de suprimentos.

REFERÊNCIAS

AMIN, S.; ZHANG, G.; A proposed mathematical model for closed-loop network configuration based on product life cycle. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 58, n. 5, pp. 791–801, jan. 2012. ISSN 0268-3768.

BALLOU, R.H., **Business Logistics Management**, 3rd ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. (pp-32-35), 1992.

BARBOSA-PÓVOA, A.; SALEMA, M.; NOVAIS, A. **Design and planning of closed-loop supply chains**. In: Papageorgiou, L., Georgiadis, M.C. (Eds), Supply Chain Optimization , vol. 7. Wiley-VCH, Germany, pp. 187-218, 2007.

BEAMON, B. M., Ware, T. M. A process quality model for the analysis, improvement and control of supply chain systems. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, v.28, n.9/10, p. 704-715, 1998.

BLOEMHOF-RUWAARD, J. M.; FLEISCHMANN M.; VAN NUNEN, J. A. E. E. Reviewing distribution issues in reverse logistics. **New trends in distribution logistics**. v. 480, s.n.. p. 23–44, jan. 1999. ISSN 00758442.

BRASIL.Secretaria da Fazenda da Bahia: Decreto Nº 8.2015 de 03/04/2002. Disponível em: <http://www.sefaz.ba.gov.br/geral/arquivos/download/dec820502_desenvolve.pdf> Acessado em: 15 de nov. de 2016

CARDOSO, S. R.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D.; RELVAS, S. Design and planning of supply chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty. **European Journal of Operational Research**. v.226, n. 3. p. 436-451, mai. 2013. ISSN 03772217.

CARDOSO, S. R.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D.; RELVAS, S.; NOVAIS, A. Q. Resilience metrics in the assessment of complex supply-chains performance operating under demand uncertainty. **Omega**. v.56, p. 53-73, mar. 2015. ISSN 03050483.

CARTER, C. R.; ELLRAM, L. M. Reverse logistics: a review of the literature and framework for future investigation. **Journal of Business Logistics**. v. 19. n. 1. p. 85-102, jul. 1998. ISSN 01976729.

CLAUSING, K.A. (2003), Tax-Motivated Transfer Pricing and US Intrafirm Trade Prices, *Journal of Public Economics* 87, 2207–2223.

COLLINS, J.H., AND D. SHACKELFORD (1997), Global Organizations and Taxes: An Analysis of the Dividend, Interest, Royalty, and Management Fee Payments between U.S. Multinationals' Foreign Affiliates, *Journal of Accounting and Economics*, 24(2), 151-173

CORDEAU, J. F.; PASIN, F.; SOLOMON, M. M. An integrated model for logistics network design. **Annals of Operations Research**. v. 144, n. 1, p. 59–82, mar. 2006. ISSN 10479006.

DESAI, M. A.; FOLEY, F.; HINES, J. R. A Multinational Perspective on Capital Structure Choice and Internal Capital Markets. **Journal of Finance**. v. 59, n. 6, pp. 2451-2488. Dez. 2004. ISSN 15406261.

DEVEREUX, M. B.; SUTHERLAND, A. Solving for Country Portfolios in Open Economy Macro Models. **IMF Working Paper**. v. 284, n. 7. Dez. 2007. ISSN 10185941.

DHARMAPALA, D. AND N. RIEDEL (2013), Earnings Shocks and Tax-Motivated Income Shifting: Evidence from European Multinationals, *Journal of Public Economics* 97, 95-107.

DOGAN, K.; GOETSCHALCKX, M. A primal decomposition method for the integrated design of multi-period production–distribution systems. **IIE Transactions**. v. 31, n. 11, p. 1027–1036, nov. 1999. ISSN 15739724.

DONDO, R. G.; MÉNDEZ, C. A. Operational Planning of Forward and Reverse Logistic Activities on Multi-Echelon Supply-Chain Networks. **Computers and Chemical Engineering**. v. 88, s.n., p. 170-184, mai. 2016. ISSN 00981354.

DOWLATSHAHI, S. Developing a theory of reverse logistics. **Journal Interfaces**. v. 30, n. 3, p. 143–155, jun. 2000. ISSN 00922102.

DYRENG, S. D.; LINDSEY, B. P.; MARKLE, K. S.; SHACKERLFORD, D. A. The effect of tax and nontax country characteristics on the global equity supply chains of U.S. multinationals. **Journal of Accounting and Economics**. v. 59, n. 2, p. 102-202, jan. 2015. ISSN 01654101.

EHRHARD, M., BRIGHAM, E., Financial Management: Theory and Practice, thirteen ed. South-Western (Chapter 10). 2010.

ERENGUC, S.; SIMPSON, N.; VAKHARIA, A. Integrated production/distribution planning in supply chains: an invited review. **European Journal of Operational Research**. v. 115, n. 2, p. 219–236, 1998. ISSN 03772217.

FLEISCHMANN, M.; BEULLENS, P.; BLOEMHOF-RUWAARD, J. M.; VAN WASSENHOF, L. N. The impact of product recovery on logistics network design. **Production and Operations Management**. v. 10, n. 2, p. 156–173, jun. 2001. ISSN 19375956.

FLEISCHMANN, M.; KRIKKE, H. R.; DEKKER, R.; FLAPPER, S. D. P. A characterization of logistics networks for product recovery. **Omega**. v. 28, n. 6, p. 653–666, dez. 2000. ISSN 03050483.

GEORGIADIS, P.; VLACHOS, D.; TAGARAS, G. The impact of product lifecycle on capacity planning of closed-loop supply chains with remanufacturing. **Production and Operations Management**. v. 15, n. 4, pp. 514-527. dez. 2006. ISSN 0144-3577.

GRUBERT, H.; MUTT, JOHN. Do Taxes Influence Where U.S. Corporations Invest? **National Tax Journal**. v. 53, n. 4, pp. 825-840. 2000. ISSN 00280283.

GUIDE JR, V. D. R.; JAYARAMAN, V.; SRIVASTAVA, R.; BENTON, W. C. Supply chain management for recoverable manufacturing systems. **Journal Interfaces**. v. 30, n. 3, p. 125–142, jun. 2000. ISSN 00922102.

GUIDE JR, V. D. R.; TEUNTER, R. H.; VAN WASSENHOVE, L. N. Matching demand and supply to maximize profits from remanufacturing. **Manufacturing & Service Operations Management**. v. 5, n. 4, p. 303–316, out. 2003. ISSN 15235498.

GUPTA, S., & MILLS, L. F. Corporate Multistate Tax Planning: Benefits of Multiple Jurisdictions. **Journal of Accounting and Economics**. v. 33, n. 1, pg. 117-139. fev. 2002. ISSN 01654101.

HUANG, X.; YAN, N.; QIU, R. Dynamic models of closed-loop supply chain and robust H1 control strategies. **International Journal of Production Research**. v. 47, n. 9, p. 2279-2300, mar. 2009. ISSN 00207543.

HUGOS, M. (2003), **Essentials of supply chain management**, 1rd ed., John Wiley and Son, Hoboken, NJ.

INDERFURTH, K.; DE KOK, A. G.; FLAPPER, S. D. P. Product recovery in stochastic remanufacturing systems with multiple reuse options. **European Journal of Operational Research**. v. 133, n. 1, p. 130–152, ago. 2001. ISSN 03772217.

JAYARAMAN, V.; PATTERSON, R. A.; ROLLAND, E. The design of reverse distribution networks: models and solution procedures. **European Journal of Operational Research**. v. 150, n. 1, p. 128–149, out. 2003. ISSN 03772217.

KEEN, MICHAEL, AND BEN LOCKWOOD, 2010, "The Value Added Tax: Its Causes and Consequences," *Journal of Development Economics*, Vol. 92 (July), pp. 138–51.

KLASSEN, K. J.; SHACKELFORD, D. State and provincial corporate tax planning: income shifting and sales apportionment factor management. **Journal of Accounting and Economics**. v. 25, n. 3, pp. 385-406. 1998. ISSN 01654101.

LEE, D.-H.; DONG, M. A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**. v. 44. n. 3, p. 455–474, mai. 2008. ISSN 13665545.

LEWELLEN, K.; ROBINSON., L. Internal ownership structures of U.S. multinational firms. **Colloquium on Tax Policy and Public Finance**. v. 1, n. 8. Mar. 2013. ISSN 0196-3570.

LU, Z.; BOSTEL, N. A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities. **Computers & Operations Research**. v. 34, n. 2, p. 299–323., fev. 2007. ISSN 03050548.

MARÍN, A.; PELEGRIN, B. The return plant location problem: Modelling and resolution. **European Journal of Operational Research**. v. 104, n. 2, p. 375–392, jan. 1998. ISSN 03772217.

MARKLE, K. S.; SHACKELFORD, D. A. Cross-Country Comparisons of Corporate Income Taxes. **National Bureau of Economic Research**. v. 65, n. 3, pp. 493-527. Set 2012. ISSN 08982937.

MELO, M. T.; NICKEL, S.; SALDANHA-DA-GAMA, F. Facility location and supply chain management - A review. **European Journal of Operational Research**. v. 196, n. 2, p. 401-412, mai. 2008. ISSN 03772217.

MEIXELL, M., GARGEYA, V. Global supply chain design: a literature review and critique. **Transportation Research Part E**. v. 41, n. 6, p. 531–550, nov. 2005. ISSN 13665545.

MINTZ, JACK M. & WEICHENRIEDER, ALFONS J., 2010. "The Indirect Side of Direct Investment: Multinational Company Finance and Taxation," MIT Press Books, The MIT Press, edition 1, volume 1, number 0262014491, December.

MITRA, S. Revenue management for remanufactured products. **Omega The International Journal of Management Science**. v. 35, n. 5, p. 553–562, nov. 2005. ISSN 03050483.

PANOS, K.; CHESTER, C.; HAIYAN, W. Supply chain management research and production and operations management: review, trends and opportunities. **Production and Operations Management**. v. 15, n. 3, p. 449–469, set 2006. ISSN 1937-5956.

PAPAGEORGIU, L. G. Supply chain optimization for the process industries: Advances and opportunities. **Computers and Chemical Engineering**. v. 33, n. 12, p. 1931-1938, jun. 2009. ISSN 00981354.

SABRI, E. H.; BEAMON. B. M. A Multi-Objective Approach to Simultaneous Strategic and Operational Planning in Supply Chain Design. **Omega**. v.28, p. 581-598, 2000. ISSN 03050483.

SAHIN, G.; SURAL, H. A review of hierarchical facility location models. **Computers & Operations Research**. v. 34, n. 8, p. 2310–2331, ago. 2007. ISSN 03050548.

SALEMA, M. I.; PÓVOA, A. P. B.; NOVAIS, A. Q. A strategic and tactical model for closed-loop supply chains. **OR Spectrum**. v. 31, n. 3, p. 573-599. jun. 2009. ISSN 14366304.

SALEMA, M. I.; PÓVOA, A. P. B.; NOVAIS, A. Q. A warehouse-based design model for reverse logistics. **Journal of the Operational Research Society**. v. 57, n. 6, p. 615-629. jun. 2006. ISSN 01605682.

SHI, J.; ZHANG, G.; SHA, J. Optimal production planning for a multi-product closed loop system with uncertain demand and return. **Computers and Operations Research**. v. 38, n. 3, pp. 641–650. Mar. 2011. ISSN 0305-0548.

SIMCHI-LEVI, D.; SIMCHI-LEVI, E.; KAMINSKY, P. (1999). Designing and managing the supply chain: Concepts, strategies, and cases. 1rd ed., McGraw-Hill Book Company. EUA.

TSIAKIS, P.; SHAH, N.; PANTELIDES, C. Design of multi-echelon supply chain networks under demand uncertainty. **Industrial and Engineering Chemical Research** v. 40, n.16, 2001. ISSN 35853604.

VIDAL, C. J.; GOETSCHALCKX, M. Strategic production-distribution models: a critical review with emphasis on global supply chain models. **European Journal of Operational Research**. v. 98, n. 1, p. 1-18, abr. 1997. ISSN 03772217.

VILA, D.; MARTEL, A.; BEAUREGARD, R. Designing logistics networks in divergent process industries: A methodology and its application to the lumber industry. **International Journal of Production Economics**. v. 102. n. 2. p. 358–378, ago. 2006. ISSN 09255273.

XIONG, Y.; ZHAO, Q.; ZHOU, Y. Manufacturer-remanufacturing vs supplier-remanufacturing in a closed-loop supply chain. **International Journal of Production Economics**. v. 176, s.n., p. 21-28, mar. 2016. ISSN 09255273.

XIONG, Y., ZHOU, Y., LI, G., CHAN, H. K., XIONG, Z.. Don't forget your supplier when remanufacturing. **European Journal of Operational Research**. v. 230, n. 1, p.15–25, out. 2013. ISSN 03772217.

ZHALECHIAN, M.; TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R.; ZAHIRI, B.; MOHAMMADI, M. Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty. **Transportation Research Part E**. v. 89, s.n., p. 182-214, fev. 2016. ISSN 13665545.

ZHANG, T.; HUANG, J. H. Cost-based pricing model with value-added tax and corporate income tax for a supply chain network. **Applied Mathematical Modelling**. v. 38, s.n., p. 168-180, jun. 2013. ISSN 0307904X.

WILHELM, W.; LIANG, D.; RAO, B.; WARRIER, D.; ZHU, X.; BULUSU, S. Design of international assembly systems and their supply chains under NAFTA. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**. v. 41, n. 6, p. 467–493, nov. 2005. ISSN 13665545.

APÊNDICE A – TABELAS DE DADOS DO MODELO

Tabela 46: Valores dos parâmetros.

Parâmetro	Valor	Aplicação
dm_{pv}	5.000.000 ($t=1$) 6.500.000 ($t=2$) 8.450.000 ($t=3$)	Todos os casos
dNc / dEI	11% / 11%	Todos os casos
$FClup$	1.000.000.000.000.000 (\$)	Todos os casos
fp_{pvt}	\$ 113,90 ($t=1$) \$ 124,90 ($t=2$) \$ 125,90 ($t=3$)	Caso A: \$ 113,90 Caso B: \$ 124,90 Caso real: \$ 125,90
im_{iv}	12.000.000 (f1); 12.000.000 (f2) (uni)	Todos os casos
in_v^S	zero (\$)	Todos os casos
is_v	36.000.000 (w1); 36.000.000 (w2); 36.000.000 (r1); 36.000.000 (r2) (uni)	Todos os casos
int_{pv}	zero (uni)	Todos os casos
ir	0%	Todos os casos

Parâmetro	Valor	Aplicação
lk_{vwt}	v w lk	Caso A
	f1 f2 \$11.904,48	Caso B
	f1 w1 \$1.310,50	
	f1 w2 \$1.190,48	
	f2 f1 \$11.904,48	
	f2 w1 \$6.941,60	
	f2 w2 \$853,50	
	m1 r1 \$580,90	
	m2 r1 \$536,70	
	m3 r2 \$494,80	
	m4 r2 \$594,80	
	r1 m1 \$580,90	
	r1 m2 \$536,70	
	r1 w2 \$6.732,50	
	r2 m3 \$494,80	
	r2 m4 \$594,80	
	r2 w1 \$11.909,48	
	w1 f1 \$1.310,50	
	w1 f2 \$6.941,60	
	w1 r2 \$11.909,48	
	w2 f1 \$1.190,48	
w2 f2 \$853,50		
w2 r1 \$6.732,50		
$lcP_{iv} / upcP_{iv}$	4.000.000 / 12.000.000 (uni)	Todos os casos
$lcS_v / upcS_v$	36.000.000 / 36.000.000	Todos os casos
nc / el	3,5% / 5%	Todos os casos
ncP_{iv} / ncS_v	1.000.000.000.000.000 / zero (uni)	Todos os casos
Oc_{ivpt}	i v t fP	
	i1 f1 1 R\$ 8,3300	
	i2 f2 1 R\$ 9,4400	
	i3 f1 1 R\$ 0,0055	Caso A com custos de i3 e i4 igual a zero;
	i4 f2 1 R\$ 0,0055	
	i1 f1 2 R\$ 9,9960	
	i2 f2 2 R\$ 11,3280	
	i3 f1 2 R\$ 0,0066	Demais casos
	i4 f2 2 R\$ 0,0066	
	i1 f1 3 R\$ 11,9952	
	i2 f2 3 R\$ 13,5936	
	i3 f1 3 R\$ 0,0079	
	i4 f2 3 R\$ 0,0079	

Parâmetro	Valor	Aplicação
pb_S	K T pb Rt 1 1 O 2 0,45 R 2 0,3 P 2 0,25 OO 3 0,2025 OR 3 0,135 OP 3 0,135 RO 3 0,1125 RR 3 0,1125 RP 3 0,09 PO 3 0,075 PR 3 0,075 PP 3 0,0625	Caso com incertezas
plo_{pvt} / pup_{pvt}	0 / 9.999.999.999.999 (uni)	Todos os casos
pt_{iv}	33,30%	Todos os casos
qr_{pp2}	p p2 qr p5 p1 1 p5 p2 1 p5 p3 1 p5 p4 1	Todos os casos
sv	0%	Todos os casos
tg	90%	Todos os casos
TP_p	3 (anos)	Todos os casos
tor_v	2,4 (vezes)	Todos os casos
tr	0%	Todos os casos
up_{vwt} / low_{vwt}	9.999.999.999.999 / 0 (uni)	Todos os casos
v_{ivt}^p / v_{vt}^s	0 / 0 (\$)	Todos os casos
f_{ivt}^p / f_{vt}^s	0 / 0 (\$)	Todos os casos

Parâmetro	Valor	Aplicação
vd_s	K T vd	Caso com incertezas
	Rt 1 1	
	O 2 1,25	
	R 2 0,99	
	P 2 0,47	
	OO 3 1,3625	
	OR 3 1,2455	
	OP 3 1,0115	
	RO 3 1,065	
	RR 3 0,987	
	RP 3 0,831	
	PO 3 0,5325	
	PR 3 0,4675	
	PP 3 0,3375	
m_{pvt}	p v rm	Todos os casos
	P1 f1 \$ 0,16	
	P1 f2 \$ 0,16	
	P2 f1 \$ 1,94	
	P2 f2 \$ 2,06	
	P3 f1 \$ 2,43	
	P3 f2 \$ 2,72	
	P4 f1 \$ 0,57	
P4 f2 \$ 0,61		

Tabela 47: Demanda dos clientes por P5 e Preço final da Venda por período.

p	v	fp	dm
P5	m1	124,9	1250000,0
P5	m2	124,9	1250000,0
P5	m3	124,9	1250000,0
P5	m4	124,9	1250000,0

