

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ARTES, CIÊNCIAS E HUMANIDADES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO

ESTÍVEL RAMOS JÚNIOR

**Um modelo de programação inteira para a otimização de um projeto de rede
de cadeia de suprimentos tributada.**

São Paulo

2022

ESTÍVEL RAMOS JÚNIOR

**Um modelo de programação inteira para a otimização de um projeto de rede
de cadeia de suprimentos tributada.**

Versão corrigida

Dissertação apresentada à Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-graduação em Sistemas de Informação.

Área de concentração: Metodologia e Técnicas da Computação

Versão corrigida contendo as alterações solicitadas pela comissão julgadora em 17 de novembro de 2022. A versão original encontra-se em acervo reservado na Biblioteca da EACH-USP e na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP (BDTD), de acordo com a Resolução CoPGr 6018, de 13 de outubro de 2011.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Freire

São Paulo

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Artes, Ciências e Humanidades,
com os dados inseridos pelo(a) autor(a)
Brenda Fontes Malheiros de Castro CRB 8-7012; Sandra Tokarevicz CRB 8-4936

Ramos Júnior, Estível

Um modelo de programação inteira para otimização de um projeto de rede de cadeia de suprimentos tributada. / Estível Ramos Júnior; orientador, Alexandre da Silva Freire. -- São Paulo, 2022.
104 p: il.

Dissertacao (Mestrado em Ciencias) - Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Informação, Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, 2022.

Versão corrigida

1. cadeia de suprimentos. 2. programação linear inteira. 3. icms. 4. projeto de redes. I. Freire, Alexandre da Silva, orient. II. Título.

Dissertação de autoria de Fulano de Tal, sob o título “**Um modelo de programação inteira para a otimização de um projeto de rede de cadeia de suprimentos tributada.**”, apresentada à Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-graduação em Sistemas de Informação, na área de concentração Metodologia e Técnicas da Computação, aprovada em _____ de _____ de _____ pela comissão julgadora constituída pelos doutores:

Prof. Dr. -----
Instituição: -----
Presidente

Prof. Dr. -----
Instituição: -----

Prof. Dr. -----
Instituição: -----

Prof. Dr. -----
Instituição: -----

Resumo

RAMOS JÚNIOR, Estível. **Um modelo de programação inteira para a otimização de um projeto de rede de cadeia de suprimentos tributada** 2022. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Um projeto de rede de cadeia de suprimentos é responsável por definir a estrutura logística da cadeia de suprimentos de uma empresa através da escolha de quais localidades serão usadas para estabelecer suas instalações e quais são os caminhos que os produtos devem percorrer para chegar ao cliente final. Essas escolhas são de longo prazo e possuem um custo elevado para a implementação das instalações mas apresentam certa flexibilidade para os fluxos de produtos. As decisões podem favorecer o menor custo, a redução do tempo de atendimento ao cliente, ou uma combinação entre os dois. A tributação constitui um fator relevante para o projeto de rede de cadeia de suprimentos quando o foco é redução de custos, pois um projeto de rede ótimo quando considerados apenas os custos logísticos, pode deixar de ser ótimo quando considerados os custos tributários, uma vez que os custos tributários mudam conforme a movimentação de produtos entre os estados. Este estudo propõe um modelo de programação inteira para a otimização de custos de um projeto de rede de cadeia de suprimentos com tributação, com ênfase no imposto que mais impacta nas decisões de rede, que é o ICMS e seus derivados, como benefícios fiscais, substituição tributária e o diferencial de alíquotas.

Palavras-chaves: Cadeia de suprimentos. Programação Linear inteira. ICMS. Projeto de redes.

Abstract

RAMOS JÚNIOR, Estível. **A Integer Programing model for a Taxed Supply Chain Network Design optimization.** 2022. 105 p. Dissertation (Master of Science) – School of Arts, Sciences and Humanities, University of São Paulo, São Paulo, 2022.

The supply chain network design is responsible for defining the logistics structure of the supply chain of a company, by choosing which locations will be used for each one of the company's facilities, as well as defining which path each good will take to meet the demand. Those are long-term decisions and have a high cost of implementation for the facilities, however, the good flows have certain flexibility to change after the network is implemented and running. The goal of the network design may be to reduce the total cost of the network, increase the service level, or a mix of both. Taxes have a great part of the network design when the focus is to reduce total costs, due the fact that an optimal design for the logistics costs alone probably will be non-optimal when considering the taxes costs, as the taxes may change according to the states it come from and goes to. This work proposes an integer programming model for the cost optimization of a taxed supply chain network design, considering the tax that impacts the network the most, the ICMS and its pairs, as icms tax benefits, icms tax substitution, and icms rate difference.

Keywords: Supply chain network. Integer linear programming. ICMS. Network Design.

Lista de figuras

Figura 1 – Grafo	21
Figura 2 – Digrafo ou grafo dirigido	21
Figura 3 – Grafo de fluxos de rede	22
Figura 4 – Caminho em um grafo	22
Figura 5 – Ciclo em um grafo	23
Figura 6 – Circuito em um grafo	23
Figura 7 – Componentes fortemente ligados	24
Figura 8 – Branch and bound: ramificação em x_1	28
Figura 9 – Branch and bound: branch em x_2	28
Figura 10 – Planos de corte	30
Figura 11 – Grafo da rede sem circuitos	40
Figura 12 – Grafo da rede com circuitos	41
Figura 13 – Representação de uma localidade no grafo	52
Figura 14 – Mecânica de saldo de ICMS considerando dois produtos (A, B)	54
Figura 15 – Demanda por UF.	72
Figura 16 – F-SBF-SRC: UFs escolhidas para o cenário sem prodepe	83
Figura 17 – F-CBF-SRC - UFs escolhidas para o cenário com prodepe	83
Figura 18 – Variação em número de arcos CD - sem restrição de circuitos	89
Figura 19 – Variação em número de arcos CD - com restrição de circuitos	89
Figura 20 – Variação em número de arcos cliente - sem restrição de circuitos	91
Figura 21 – Variação em número de arcos cliente - com restrição de circuitos	91
Figura 22 – Variação em número de arcos produtos - sem restrição de circuitos	93
Figura 23 – Variação em número de arcos produtos - com restrição de circuitos	93

Lista de algoritmos

Algoritmo 1 – Método de <i>branch-and-bound</i>	29
Algoritmo 2 – Método de <i>branch-and-cut</i>	31
Algoritmo 3 – Plano de corte para eliminação de circuitos	62

Lista de quadros

Quadro 1 – Resumo da condução da revisão sistemática antes de aplicar os critérios de qualidade	44
Quadro 2 – Tipos de modelos e categorias de problema abordados pelos artigos selecionados na revisão sistemática.	47
Quadro 3 – Tipos de instâncias dos artigos selecionados na revisão sistemática. . .	48
Quadro 4 – Resolvedores de PLIM e estratégias utilizadas para otimização pelos artigos selecionados na revisão sistemática.	49
Quadro 5 – Exemplo de parametrização tributária para os parâmetros m e n sem crédito presumido (1 de 2).	74
Quadro 6 – Exemplo de parametrização tributária para os parâmetros m e n sem crédito presumido (R\$) (2 de 2).	75
Quadro 7 – Exemplo de parametrização tributária para os parâmetros m e n com crédito presumido (1 de 2)	76
Quadro 8 – Exemplo de parametrização tributária para os parâmetros m e n com crédito presumido. Valores em R\$ (2 de 2)	76
Quadro 9 – Matriz de distancias (km) (1 de 3)	98
Quadro 10 – Matriz de distancias (km) (2 de 3)	99
Quadro 11 – Matriz de distancias (km) (3 de 3)	100
Quadro 12 – Matriz de fretes (R\$) (1 de 3)	101
Quadro 13 – Matriz de fretes (R\$) (2 de 3)	102
Quadro 14 – Matriz de fretes (R\$) (3 de 3)	103
Quadro 15 – Alíquotas de Impostos Federais	104
Quadro 16 – Alíquotas de ICMS (%) (1 de 2)	104
Quadro 17 – Alíquotas de ICMS (%) (2 de 2)	105

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parametrização tributária geradora de circuitos.	40
Tabela 2 – Arcos e custos do grafo sem circuitos	40
Tabela 3 – Saldo de ICMS sem circuitos	41
Tabela 4 – Arcos e custos do grafo com circuitos	41
Tabela 5 – Saldo de ICMS com circuitos	41
Tabela 6 – Custos e capacidades atribuídos para cada tipo de arco.	53
Tabela 7 – Lista geral de bases	69
Tabela 8 – Formatação de dados para arcos	70
Tabela 9 – Formatação de dados para vértice	70
Tabela 10 – Formatação de dados para demandas e fornecimento	70
Tabela 11 – Base farmacológica: custos fixos e capacidades	71
Tabela 12 – Demandas por UF	73
Tabela 13 – Composição para os valores de frete	74
Tabela 14 – Características das instâncias artificiais	78
Tabela 15 – Lista de cenários	79
Tabela 16 – Resumo de resultados dos cenários farmacológicos	81
Tabela 17 – Volume de cada localidade por cenário farmacológico	82
Tabela 18 – Comparativo de resultados entre cenários com e sem PRODEPE	84
Tabela 19 – Comparativo de ICMS por UF entre cenários	85
Tabela 20 – Resultados dos cenários artificiais	86
Tabela 21 – Métricas de solução dos cenários artificiais	87
Tabela 22 – Variação de tempo de solução entre modelos em função da quantidade de arcos em nível CD nos dados de entrada	88
Tabela 23 – Tempo de <i>callback</i> para cenários com restrição de circuitos em função da quantidade de arcos CD nos dados de entrada	88
Tabela 24 – Variação de tempo de solução entre modelos em função da quantidade de arcos em nível cliente nos dados de entrada	90
Tabela 25 – Tempo de <i>callback</i> para cenários com restrição de circuitos em função da quantidade de arcos cliente nos dados de entrada	90

Tabela 26 – Variação de tempo de solução entre modelos em função da quantidade de produtos nos dados de entrada	92
Tabela 27 – Tempo de <i>callback</i> para cenários com restrição de circuitos em função da quantidade de produtos nos dados de entrada	92

Lista de abreviaturas e siglas

COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social.
DIFAL	Diferencial de Alíquota do ICMS.
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços.
ICMS-ST	Substituição Tributária do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços.
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
PIS	Programa de Integração Social.
PRSCT	Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos com Tributação.

Sumário

1	Introdução	15
1.1	<i>Área de Pesquisa</i>	15
1.2	<i>Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos</i>	15
1.3	<i>Motivação</i>	15
1.4	<i>Lacuna</i>	16
1.5	<i>Hipóteses</i>	16
1.6	<i>Objetivos</i>	16
1.7	<i>Justificativa</i>	17
1.8	<i>Metodologia</i>	17
1.9	<i>Avaliação</i>	17
1.10	<i>Contribuições</i>	18
1.11	<i>Escopo</i>	18
2	Fundamentação teórica	20
2.1	<i>Teoria de grafos</i>	20
2.1.1	Grafo	20
2.1.2	Grafo dirigido	21
2.1.3	Grafo de fluxos de rede	21
2.1.4	Caminhos, ciclos e circuitos	22
2.1.5	Componentes fortemente ligados	23
2.2	<i>Programação linear e programação inteira</i>	24
2.2.1	Métodos de resolução de programação inteira	25
3	O Problema do Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos	
	Tributada	32
3.1	<i>Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos</i>	32
3.2	<i>O impacto da tributação brasileira no Projeto de Redes de Cadeia de</i> <i>Suprimentos</i>	34
3.2.1	Impostos Federais	34
3.2.2	Impostos Estaduais	35
3.2.3	Benefícios Fiscais	36

3.2.4	Exemplos de tipos de benefícios fiscais	37
3.2.5	ICMS-ST: Substituição Tributária do ICMS	38
3.2.6	Difal	38
3.2.7	O problema dos circuitos tributários	39
4	Revisão Bibliográfica	42
4.1	<i>Protocolo</i>	42
4.1.1	Objetivo	42
4.1.2	Questões de pesquisa	42
4.1.3	Controle	42
4.1.4	Resultados	42
4.1.5	Seleção de fontes	42
4.1.6	Palavras-chaves	43
4.1.7	Listagem de fontes	43
4.1.8	Critérios de inclusão e critérios de exclusão dos trabalhos	43
4.1.9	Critérios de qualidade dos estudos primários	43
4.2	<i>Condução da Revisão Sistemática</i>	44
4.2.1	Artigos selecionados	45
4.2.2	Comparativo dos artigos selecionados	46
5	Construção do modelo de programação linear inteira	50
5.1	<i>Projeto de Rede Multiproduto de Custo Fixo Capacitado.</i>	50
5.2	<i>Desenvolvimento do modelo e atribuição de custos</i>	51
5.2.1	Abertura da demanda por vértice	51
5.2.2	Representação de Localidades	52
5.2.3	Atribuição de custos e capacidades logísticas	53
5.2.4	Restrição e custos para o Saldo de ICMS	54
5.2.5	Crédito Presumido de ICMS	57
5.2.6	DIFAL	58
5.2.7	ICMS-ST	58
5.2.8	Custos de aquisição de produtos	59
5.2.9	Eliminação de circuitos	60

5.3	<i>Construção dos modelos de programação inteira propostos para o problema de Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos com Tributação.</i>	62
5.3.1	Definição de conjuntos	62
5.3.2	Dados e cálculos de entrada	63
5.4	<i>Modelos propostos</i>	66
5.4.1	Modelo de programação inteira sem restrição de circuitos	66
5.4.2	Modelo de Programação Inteira com restrição de circuitos	67
6	Coleta de dados e geração de instâncias	69
6.1	<i>Organização dos dados</i>	69
6.2	<i>Instâncias com dados do setor farmacológico</i>	71
6.2.1	Descrição da base coletada	71
6.2.2	Instância farmacológica: sem benefício fiscal	73
6.2.3	Instância farmacológica: com benefício fiscal	76
6.3	<i>Instâncias geradas artificialmente</i>	78
7	Experimentos computacionais	79
7.1	<i>Metodologia</i>	80
7.2	<i>Resultados do primeiro grupo de instâncias: farmacológica</i>	80
7.2.1	Desenho logístico do resultado	82
7.2.2	Análise de resultado financeiro	84
7.3	<i>Resultados do segundo grupo de instâncias: artificiais</i>	85
7.3.1	Resultados gerais	86
7.3.2	Varição da quantidade de arcos de nível CD	88
7.3.3	Varição da quantidade de arcos de nível cliente	89
7.3.4	Varição da quantidade de produtos	91
8	Conclusão e trabalhos futuros	94
	Referências¹	95
	Apêndice A – Dados para cálculo de fretes	98
	Apêndice B – Alíquotas de ICMS	104

¹ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

1 Introdução

1.1 Área de Pesquisa

Na engenharia de produção e na logística, a programação inteira é utilizada dentro da Pesquisa Operacional, que segundo a Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional (SOBRAPO), “é a área de conhecimento que estuda, desenvolve e aplica métodos analíticos avançados para auxiliar na tomada de melhores decisões nas mais diversas áreas de atuação humana”.

1.2 Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos

Segundo Chopra e Meindl (2012), uma cadeia de suprimentos engloba todas as partes envolvidas, direta ou indiretamente, no atendimento de uma solicitação do consumidor. Ela inclui fabricantes, fornecedores, transportadores, armazéns, revendedores e os próprios consumidores. Dentro do escopo de um fabricante, a cadeia de suprimentos inclui seus fornecedores e o seus consumidores. Ainda segundo Chopra e Meindl (2012), as decisões de um Projeto de Rede e Cadeia de Suprimentos (PRCS) incluem a localização de instalações como fábricas, armazéns, centros de distribuição e outras localidades relacionadas ao transporte, bem como suas capacidades e a quais demandas elas irão atender. Desta forma, o objetivo da otimização de um PRCS é definir os melhores caminhos para escoar os produtos de uma determinada empresa, desde a escolha do fornecedor até a entrega do produto final ao cliente, passando por instalações como Fábricas, Centros de Distribuição e *Cross-Dockings*, garante que todas as demandas sejam atendidas em sua totalidade e em tempo adequado, minimizando os custos logísticos e tributários envolvidos.

1.3 Motivação

O problema da otimização logística um PRCS é um problema bastante discutido e conhecido na literatura, porém para o PRCST (Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos Tributada) existe uma complexidade extra por conta do cenário tributário brasileiro, que traz as especificidades de cada empresa em função do mercado em que ela está inserida. Esta tributação e seu conjunto de regras pode passar por constantes mudanças devido

à política econômica de cada estado, gerando uma necessidade constante de estudo e atualização do projeto de rede e os fluxos das mercadorias.

1.4 *Lacuna*

Publicações relacionados a otimização de custos logísticos e tributários de redes de cadeia de suprimentos geralmente possuem uma abordagem com foco na solução ótima e na complexidade do problema, deixando em segundo plano o desempenho do modelo proposto. Entre estes trabalhos, pode-se citar os escritos por Silva (2007) e por Lauterbach (2017), que abordam o contexto tributário brasileiro, mas não entram em temas relacionados ao tempo de resolução do problema ou métodos de interação com o solver, como métodos de corte especializados. Desta forma, são inexistentes estudos que tragam resultados de desempenho para a resolução do problema do PRCST.

1.5 *Hipóteses*

Desenvolver um modelo base para o problema do PRCST que possa ser usado em aplicações reais, bem como em outros estudos que tenham por objetivo a redução de custos de um PRCST, considerando características específicas de mercado e produtos. Como contribuição secundária espera-se que este trabalho possa ser usado como uma base de comparação de desempenho para o problema do PRCST.

1.6 *Objetivos*

- Definir o problema de minimização dos custos, logísticos e tributários, de um projeto de rede de cadeia de suprimentos.
- Com base nos dados de uma empresa do setor de cosméticos, desenvolver um modelo de Programação Inteira que encontre uma solução de valor mínimo para o problema definido, visando não somente a solução ótima, mas também um bom desempenho computacional.
- Realizar medições de desempenho para o modelo proposto, em diferentes instâncias, e assim estabelecer bases de comparação de desempenho computacional.

1.7 *Justificativa*

O desenvolvimento de um modelo base para a otimização de um Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos com Tributação possui grande aplicação prática. Tanto no meio empresarial como acadêmico, pode ser utilizado como ponto de partida para a construção de modelos mais específicos, que atendam às necessidades específicas de cada projeto e indústria. Obter resultados de tempo de processamento que poderão ser usados como base de comparação para trabalhos futuros, acadêmicos ou comerciais, que abordem a otimização de redes logísticas e tributárias dentro do cenário fiscal brasileiro.

1.8 *Metodologia*

Esta é uma pesquisa quantitativa e explicativa, de gênero e natureza prática, que visa a redução de custos logísticos e tributários através de um modelo de Programação Inteira. A metodologia propõe os seguintes passos:

- Coleta e tratamento de dados
- Definição do Escopo e Formulação do Problema
- Definição de quais técnicas serão abordadas
- Revisão Sistemática
- Modelagem
- Desenvolvimento
- Avaliação

1.9 *Avaliação*

O trabalho será avaliado através de duas métricas principais. A primeira analisa os benefícios financeiros gerados pelo estudo desenvolvido, e a segunda aborda os tempos de resolução dos métodos empregados.

A primeira métrica, que trata do benefício financeiro gerado pelo modelo, é do tipo extrínseca. Seu objetivo é medir o resultado do problema analisado, que é a redução da soma dos custos logísticos e tributários, é composta por:

- **Cenário Base:** custo logístico e tributário real da empresa estudada.

- **Cenário Otimizado:** custo logístico e tributário otimizado da empresa estudada.
- **Métricas:** Diferenças entre o cenário base e o cenário otimizado: custo logístico de transporte; Custo logístico de armazenagem; Custo tributário.

A segunda métrica é uma avaliação do tipo intrínseca, sendo composta por:

Métricas: Tempo de resolução dos cenários.

1.10 Contribuições

Este trabalho representa uma contribuição para o conhecimento de modelos de otimização combinatória aplicada no campo de cadeia de suprimentos no cenário tributário nacional. Como contribuição primária, espera-se contribuir com um modelo de otimização para um projeto de rede de cadeia de suprimentos que contemple os principais impactos da tributação brasileira. Como contribuição secundária, ao estabelecer um modelo base para a otimização do problema do Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos com Tributação, espera-se obter resultados que contribuam como cenário base para implementações futuras, tais como:

- Tempos de resolução em função do tamanho e tipos de instâncias.
- Número e tipo de variáveis criadas pelo modelo.
- Quantidade de níveis dentro da cadeia de suprimentos (Fábricas, CDs, Clientes)
- Base de comparação para estimar uma potencial redução de custos para uma otimização de um Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos com Tributação.

1.11 Escopo

O escopo deste projeto limita-se ao estudo de um Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos com Tributação, levando em consideração um número qualquer de tipo de localidades entre os fornecedores e clientes. Estas localidades podem ser de diferentes tipos, como por exemplo Centros de Distribuição, Pontos de Passagem, etc. Considera também diferentes produtos e perfis de veículos.

No âmbito fiscal, se preocupa com ICMS, ICMS-ST e benefícios fiscais relacionados ao ICMS, ficam de fora os impostos federais como PIS, COFINS e IPI, que embora entrem na base da cálculo do ICMS, não possuem influência sobre o resultado final dos fluxos da

projeto de rede, por não possuírem variação conforme a mudança da localização de um determinado armazém ou fábrica, ou pela variação dos fluxos que transitam as mercadorias.

2 Fundamentação teórica

Neste capítulo, serão apresentados os principais conceitos e teorias usados no decorrer deste trabalho. A seção 2.1 aborda conceitos sobre a teoria dos grafos e a seção 2.2 aborda os conceitos de programação linear inteira.

2.1 Teoria de grafos

Nesta seção serão apresentados alguns conceitos básicos sobre a teoria de grafos que serão usado no decorrer deste trabalho. Os conceitos foram retirados de Diestel (2017) e Mariani (2022).

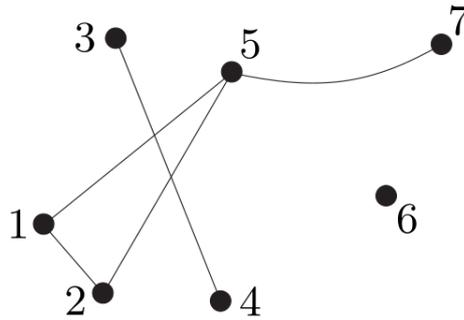
2.1.1 Grafo

Um grafo é dado por $G(V, A)$, onde V é o conjunto de vértices (ou nós), e A é o conjunto de arestas (ou linhas), onde $A \subseteq [V]^2$, ou seja, A é composto por pares de elementos de V , tal que $V \cap A = \emptyset$.

A figura 1 representa um grafo onde $V = \{1, \dots, 7\}$ e $A = \{\{1,2\}, \{1,5\}, \{2,5\}, \{3,4\}, \{5,7\}\}$.

O número de vértices de um grafo é chamado de ordem e é dado pela cardinalidade de V , ou seja, pelo número de elementos presentes em V , e sua grafia é $|G|$. Já o número de arestas é grafada como $\|G\|$, e é dado pela cardinalidade de A . No caso de um conjunto qualquer C que não seja um grafo, tal que $C \cap G = \emptyset$, a cardinalidade do conjunto C é grafada por $|C|$.

Figura 1 – Grafo

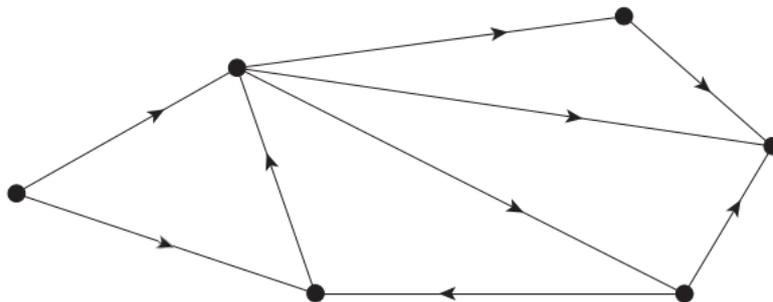


Fonte: Diestel (2017)

2.1.2 Grafo dirigido

Um grafo dirigido — ou grafo orientado, ou digrafo — é um grafo onde o conjunto de arestas A possui uma relação não simétrica, existindo assim uma relação de orientação, de forma que cada elemento de A é dado por $\{\text{ini}(v), \text{fim}(v)\}$, onde $v \in V$, e $\text{ini}()$ indica o vértice de início e $\text{fim}()$ indica o vértice de fim. Quando um aresta possui essa relação de orientação passa a ser denominada de arco, ou seja, em um grafo dirigido $G(V, A)$, V é o conjunto de vértices, e A é o conjunto de arcos. Note que no exemplo da figura 2 os arcos possuem uma seta que indica o sentido do arco.

Figura 2 – Digrafo ou grafo dirigido



Fonte: Adaptado de Diestel (2017)

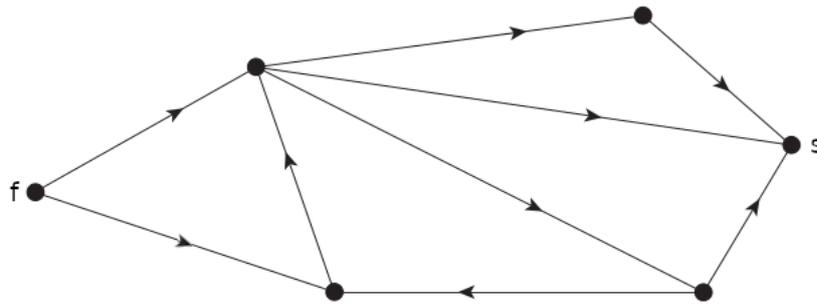
2.1.3 Grafo de fluxos de rede

Um grafo é um fluxo de rede se este é um grafo dirigido e possui ao menos um vértice do tipo fonte e um vértice do tipo sumidouro. Um vértice f é uma fonte se ele não

é o destino de nenhum arco, de modo que $\text{fim}(f) = \emptyset$. Um vértice s é um sumidouro se ele não é a origem de nenhum arco, de modo que $\text{ini}(s) = \emptyset$.

A figura 3 ilustra um grafo de rede de fluxos, onde o vértice f é o vértice fonte, e o vértice s é o vértice sumidouro.

Figura 3 – Grafo de fluxos de rede

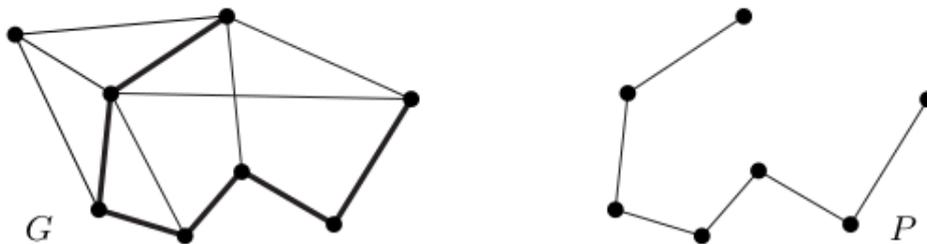


Fonte: Adaptado de Diestel (2017)

2.1.4 Caminhos, ciclos e circuitos

Um caminho é um subgrafo não vazio $P(V, A)$ tal que $P \subseteq G$, onde $V = \{x_0, \dots, x_k\}$, e $A = \{\{x_0, x_1\}, \{x_1, x_2\}, \dots, \{x_{k-1}, x_k\}\}$ e x_i são todos vértices distintos. Os vértices x_0 e x_k estão ligados pelo caminho P . A figura 4 ilustra um caminho $P \subset G$.

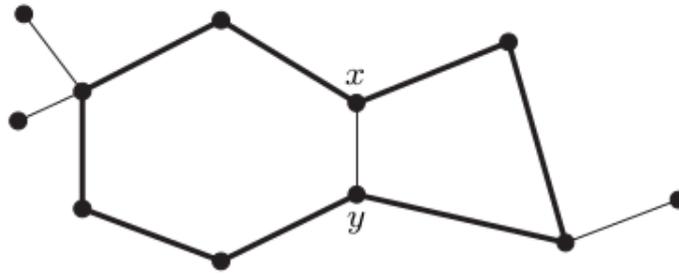
Figura 4 – Caminho em um grafo



Fonte: Diestel (2017)

Um ciclo é um caminho fechado, onde o primeiro e último vértices do caminho são os mesmos, de forma que o ciclo $C(V, A)$, onde $A = \{\{x_0, x_1\}, \{x_1, x_2\}, \dots, \{x_k, x_0\}\}$ é dado conforme a figura 5.

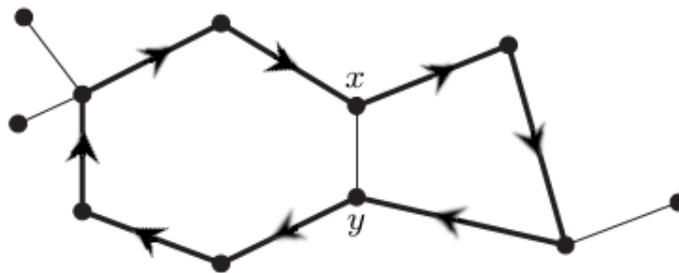
Figura 5 – Ciclo em um grafo



Fonte: Diestel (2017)

Um circuito é um ciclo em um grafo dirigido, de forma que o ciclo é composto por arcos e possui um sentido, conforme o exemplo da figura 6.

Figura 6 – Circuito em um grafo

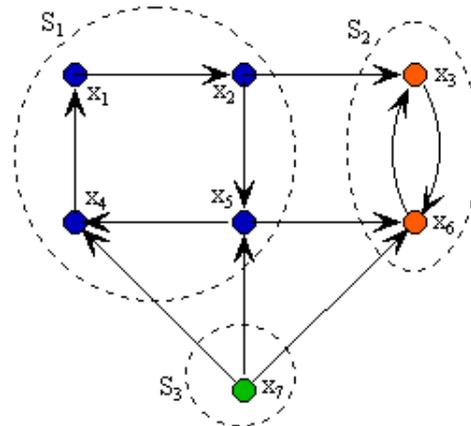


Fonte: adaptado de Diestel (2017)

2.1.5 Componentes fortemente ligados

Um vértice é fortemente ligado a outro quando há ao menos um caminho que ligue um vértice ao outro, e vice-versa. Um componente fortemente ligado é um subgrafo composto apenas com vértices fortemente ligados entre si, ou seja, todo vértice do subgrafo possui um caminho que o ligue a um outro vértice do subgrafo. Como todo componente fortemente ligado possui apenas vértices que são fortemente ligados entre si, acarreta que os vértices que compõem um componente não podem estar em outro componente, como podemos ver na figura 7.

Figura 7 – Componentes fortemente ligados



Fonte: Mariani (2022)

2.2 Programação linear e programação inteira

Nesta seção serão apresentados conceitos referentes a programação linear e programação inteira, conforme abordados por Conforti, Cornuejols e Zambelli (2014).

Um modelo de programação linear é composto por um conjunto de expressões lineares como no exemplo abaixo. Seu objetivo é minimizar ou maximizar uma dada função objetivo (1) sujeito a um grupo de restrições, que no exemplo são as inequações (2) e (3). Onde c é um vetor constante de tamanho n , sendo $c = (c_1, \dots, c_n)$. b é um vetor constante de tamanho m , sendo $b = (b_1, \dots, b_m)$. O vetor x contém as variáveis que devem ser otimizadas para minimizar a função objetivo e é dado por $x = (x_1, \dots, x_n)$. A matriz A possui tamanho $m \times n$ e é dada por $A = (a_{ij})$.

O conjunto de soluções viáveis é composto pelos valores de x tal que as restrições sejam respeitadas, e é definido como $S = \{x \in \mathbb{R}_+^n \mid A \cdot x\}$

$$\max c \cdot x \tag{1}$$

$$\text{Sujeito a } A \cdot x \leq b \tag{2}$$

$$x \geq 0 \tag{3}$$

Um modelo de programação inteira puro (4) é um caso especial de um modelo linear onde existe a restrição de integralidade para todas as variáveis, de forma que $x \in \mathbb{Z}$. Desta forma, o conjunto de soluções viáveis passa a ser $S = \{x \in \mathbb{Z}_+^n \mid A \cdot x \leq b\}$

$$\begin{aligned}
& \max c \cdot x \\
& \text{Sujeito a } A \cdot x \leq b \\
& x \geq 0, x \in \mathbb{Z}
\end{aligned} \tag{4}$$

Já um modelo de programação inteira mista (5) contém tanto variáveis inteiras como variáveis contínuas. Neste caso existem dois vetores de variáveis, $x \in \mathbb{Z}$ e $y \in \mathbb{R}$, tal que $x = (x_1, \dots, x_n)$ e $y = (y_1, \dots, y_p)$, dois vetores constantes c e h , onde $x = (x_1, \dots, x_n)$ e $h = (h_1, \dots, h_p)$, e duas matrizes A e G , sendo $A = (a_{ij})$ de tamanho $m \times n$ e $G = (g_{ij})$ de tamanho $m \times p$. Seu conjunto de soluções viáveis é definido por $S = \{(x, y) \in \mathbb{Z}_+^n \times \mathbb{R}_+^p \mid A \cdot x + G \cdot y \leq b\}$. Com o objetivo de facilitar a compreensão, adotaremos o termo de programação inteira também para os modelos de programação inteira mista.

$$\begin{aligned}
& \max c \cdot x + h \cdot y \\
& \text{Sujeito a } A \cdot x + G \cdot y \leq b \\
& x \geq 0, x \in \mathbb{Z} \\
& y \geq 0, y \in \mathbb{R}
\end{aligned} \tag{5}$$

Outra particularidade da programação inteira é a restrição binária para as variáveis inteiras, de forma que $x \in \mathbb{Z}$ passa a ser definido como $x \in \{0, 1\}$. Tal abordagem é bem difundida e muito útil para modelagem de problemas práticos.

Resolver um problema de programação inteira é uma tarefa complexa, uma vez que a enumeração de todos o conjunto de soluções viáveis S pode aumentar fatorialmente em relação a entrada de dados. Desta forma, o desafio é encontrar o conjunto de soluções de forma mais eficiente do que uma simples enumeração (CONFORTI; CORNUEJOLS; ZAMBELLI, 2014).

A seguir, na seção 2.2.1, serão expostos dois métodos bem estabelecidos para a resolução de problemas de programação inteira.

2.2.1 Métodos de resolução de programação inteira

Nesta seção, serão apresentados os dois principais métodos utilizados para resolução de problemas de programação inteira mista, amplamente difundidos e utilizados por

resolvedores gratuitos e resolvedores comerciais, como o IBM Cplex[®], que será utilizado no capítulo 7 na implementação do modelo e realização dos experimentos computacionais.

Conforti, Cornuejols e Zambelli (2014) definem a programação linear como um dos maiores sucessos da matemática computacional, possuindo excelentes algoritmos tanto em teoria como em prática. Por isso, ambos os métodos expostos a seguir se baseiam na estratégia de relaxação linear, que consiste em transformar um problema de programação inteira em um problema de programação linear, retirando a restrição de integralidade das variáveis, de forma que o conjunto de soluções viáveis $S = \{(x, y) \in \mathbb{Z}_+^n \times \mathbb{R}_+^p \mid A \cdot x + G \cdot y \leq b\}$, passa a ser definido como $SL = \{(x, y) \in \mathbb{R}_+^n \times \mathbb{R}_+^p \mid A \cdot x + G \cdot y \leq b\}$, sendo SL a relaxação linear de S , o que implica que $S \subseteq SL$. O objetivo da relaxação linear é encontrar uma solução não exata porém próxima o suficiente e, sendo a resolução de problemas lineares mais fácil de ser efetiva, reduzir o tempo de resolução.

Desta forma, define-se o modelo base de programação inteira como $PI = \max\{c \cdot x + h \cdot y \mid (x, y) \in S\}$ sendo $S = \{(x, y) \in \mathbb{Z}_+^n \times \mathbb{R}_+^p \mid A \cdot x + G \cdot y \leq b\}$ o conjunto de soluções viáveis, (x^*, y^*) a solução ótima e z^* o valor ótimo da função objetivo. E sua relaxação linear é dada por $PL = \max\{c \cdot x + h \cdot y \mid (x, y) \in SL\}$ sendo $SL = \{(x, y) \in \mathbb{R}_+^n \times \mathbb{R}_+^p \mid A \cdot x + G \cdot y \leq b\}$ o conjunto de soluções viáveis, (x^0, y^0) a solução ótima e z^0 o valor ótimo da função objetivo.

Branch and bound

Considerando x_j^0 sendo fracional, tal que $0 \leq j \leq n$, cria-se duas ramificações (do inglês *branch*) para o conjunto de soluções S :

$$S_1 = S \cap \{(x, y) \mid x_j \leq \lfloor x_j^0 \rfloor\}$$

$$S_2 = S \cap \{(x, y) \mid x_j \geq \lceil x_j^0 \rceil\}$$

Onde $\lfloor x_j^0 \rfloor$ indica o maior número inteiro $k \leq x_j^0$ e $\lceil x_j^0 \rceil$ indica o menor número inteiro $k \geq x_j^0$.

A partir desta ramificação, cria-se dois problemas de programação inteira, de forma que o problema original se resume a resolver os problemas PI_1 e PI_2 .

$$PI_1 = \max\{c \cdot x + h \cdot y \mid (x, y) \in S_1\}$$

$$PI_2 = \max\{c \cdot x + h \cdot y \mid (x, y) \in S_2\}$$

Aplicando a relaxação linear, tem-se os conjuntos de soluções viáveis P_1 e P_2 , e os problemas de programação linear PL_1 e PL_2

$$SL_1 = SL_0 \cap \{(x, y) | x_j \leq \lfloor x_j^0 \rfloor\}$$

$$SL_2 = SL_0 \cap \{(x, y) | x_j \geq \lceil x_j^0 \rceil\}$$

$$PL_1 = \max\{c \cdot x + h \cdot y | (x, y) \in P_1\}$$

$$PL_2 = \max\{c \cdot x + h \cdot y | (x, y) \in P_2\}$$

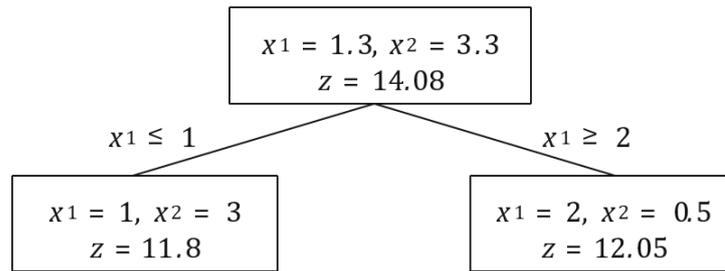
A partir da resolução de PI_1 e PI_2 , para cada solução têm-se um dos seguintes casos:

- (i) Inviável. Poda por inviabilidade.
- (ii) Solução ótima de PL_i é dado por (x^i, y^i) , com z_i sendo seu valor ótimo para $i = 1, 2$
 - (iia) x^i solução encontrada é integral: PI_i está resolvido e z_i torna-se z^* , a melhor solução viável de PI , uma vez que $S_i \subset S$ e $z_i \subset z^*$. Poda por integralidade.
 - (iib) x^i não é integral e z_i é uma solução pior do que uma solução já conhecida, desta forma não pode conter uma solução melhor. Poda por limitante.
 - (iic) x^i não é integral e z_i é uma solução melhor do que uma solução já conhecida. Repete o processo com uma nova ramificação. Não há poda neste nó.

O modelo (6) será usado como base para um exemplo prático.

$$\begin{aligned} \max \quad & 5,5 \cdot x_1 + 2,1 \cdot x_2 \\ \text{Sujeito a} \quad & -1 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 \leq 2 \\ & 8 \cdot x_1 + 2 \cdot x_2 \leq 17 \\ & x_1 \quad , \quad x_2 \geq 0 \\ & x_1 \quad , \quad x_2 \in \mathbb{Z} \end{aligned} \tag{6}$$

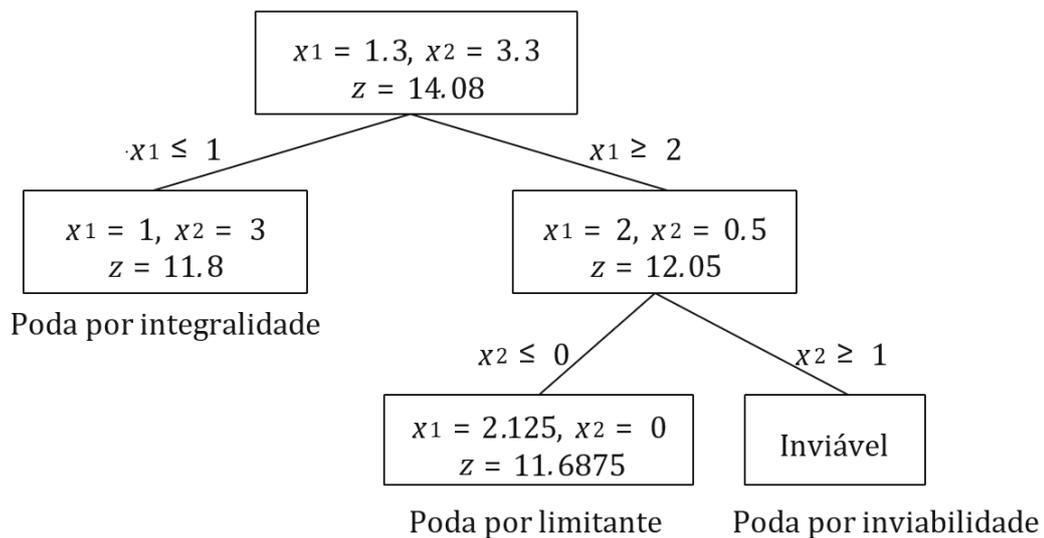
Conforme o modelo (6) e o exemplo da figura 8, o valor da solução linear ótima é 14,08 com $x_1 = 1,3$ e $x_2 = 3,3$, sendo este o limitante superior da solução inteira. A partir dessa solução, faz-se a ramificação para o piso e teto inteiros de x_1 , onde $x_1 \leq 1$ e $x_1 \geq 2$. No ramo onde $x_1 \leq 1$ encontramos os valores inteiros $x_1 = 1$ e $x_2 = 3$, para uma solução $z = 11,8$ que se enquadra no caso (iia). Este ramo é podado e a solução $z = 11,8$ é tomada como uma melhor solução para z^* .

Figura 8 – Branch and bound: ramificação em x_1 

Poda por Integralidade

Fonte: Conforti, Cornuejols e Zambelli (2014)

O ramo $x_1 \geq 2$ possui valores fracionários, não sendo uma solução viável para PI , e possui $z \geq z^*$, o que indica que ainda pode existir uma solução melhor, se enquadrando no caso **(iic)**. Desta forma, faz-se uma nova ramificação a partir do ramo $x_1 \geq 2$ na variável x_2 , com $x_2 \leq 0$ e $x_2 \geq 1$, conforme a figura 9.

Figura 9 – Branch and bound: branch em x_2 

Poda por integralidade

Poda por limitante

Poda por inviabilidade

Fonte: Conforti, Cornuejols e Zambelli (2014)

O ramo $x_2 \geq 2$ é inviável porque quebra a restrição $8 \cdot x_1 + 2 \cdot x_2 \leq 17$, uma vez que $8 \cdot 2 + 2 \cdot 1 \not\leq 17$, se encaixando no caso **(i)** e sofrendo poda por inviabilidade. Já o ramo $x_2 \leq 0$ é viável e possui uma solução inteira, porém o valor da solução é pior do que o valor já encontrado anteriormente, onde $z \leq z^*$, se enquadrando assim no caso **(iib)** e

sofrendo poda por limitante. Como não há mais nós a serem abordados, o valor ótimo inteiro é dado por $z^* = 11,8$.

Algoritmo 1 Método de *branch-and-bound*

procedure BRANCH-AND-BOUND

$nós \leftarrow \{nó_0\}$

$\underline{z} \leftarrow -\infty$

$x^* \leftarrow \emptyset$

 seja S o conjunto de soluções de PI

while $nós \neq \emptyset$ **do**

 escolha e remova um nó $nó_i$ de $nós$

$PL_i \leftarrow \text{RELAXACAO-LINEAR}(MP_i)$

if $\text{RESOLVE}(PL_i)$ não é viável **then**

continue

 ▷ poda por inviabilidade

else

$x^i \leftarrow \text{SOLUCAO-OTIMA}(PI_i)$

$z_i \leftarrow \text{VALOR-SOLUCAO}(PI_i)$

if $z_i \leq \underline{z}$ **then**

continue

 ▷ poda por limitante

else

if $x^i \in \mathbb{N}$ **then**

 ▷ poda por integralidade

$x^* \leftarrow x^i$

$\underline{z} \leftarrow z_i$

else

 ▷ ramificação (*branch*)

 escolha um valor j tal que $x_j^i \notin \mathbb{N}$

$S_{i_1} := S_i \cap \{x : x_j \leq \lfloor x_j^i \rfloor\}$

$S_{i_2} := S_i \cap \{x : x_j \geq \lceil x_j^i \rceil\}$

 sejam PI_{i_1} , PI_{i_2} e $nó_{i_1}$, $nó_{i_2}$ referentes a S_{i_1} e S_{i_2}

 adicione $nó_{i_1}$ e $nó_{i_2}$ a $nós$

return x^*

Fonte: Adaptado de Conforti, Cornuejols e Zambelli (2014)

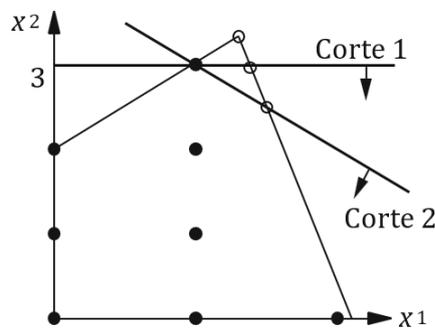
Branch and cut

O método de *branch and cut* é uma segunda opção para resolver problemas de PI quando $(x_0, y_0) \neq (x^*, y^*)$, ou seja, quando a solução encontrada para o problema linearmente relaxado não é uma solução inteira, tal que $z_0 \notin S$. Ele se baseia em encontrar desigualdades chamadas de planos de corte, que separam o conjunto de soluções inteira S , do conjunto de soluções lineares SL . Uma desigualdade $\alpha \cdot x + \gamma \cdot y \leq \beta$ é considerada uma plano de corte de S quando é violada por (x_0, y_0) , de tal forma que $\alpha \cdot x_0 + \gamma \cdot y_0 \not\leq \beta$ e $PL_1 = PL_0 \cap \{(x, y) | \alpha \cdot x + \gamma \cdot y \leq \beta\}$, implicando que $S \subseteq PL_1 \subset PL_0$.

Tal abordagem tem dois principais usos e benefícios, o primeiro é encontrar soluções lineares mais próximas da solução inteira, como visto no exemplo da figura 10, de forma a diminuir a diferença entre o resultado inteiro e o resultado linear.

A figura 10 contém um conjunto de soluções inteiras, composto pelos pontos, e um conjunto de soluções lineares composto pelo poliedro, onde dois planos de corte são aplicados. Observe que tanto o corte 1 como o corte 2 diminuem a área de soluções lineares sem excluir nenhum ponto da solução inteira, de forma que a distância entre as soluções inteiras e lineares diminui.

Figura 10 – Planos de corte



Fonte: Conforti, Cornuejols e Zambelli (2014)

O segundo uso é quando o modelo possui um número muito grande de restrições, o que o deixa mais complexo e difícil de resolver. Essas restrições são retiradas do modelo inicial e, a partir de um problema de separação pré-definido, inclui-se cada restrição no decorrer do andamento do algoritmo, de forma que apenas as restrições que realmente vão interferir em S sejam adicionadas ao modelo. Essa abordagem será utilizada na seção 5.2.9, onde será construído um problema de separação que encontra os planos de corte que serão utilizados no modelo da seção 5.4.2, com o objetivo de retirar estruturas não permitidas no desenho da rede logística e tributária.

O algoritmo 2 - *branch and cut* é baseado no algoritmo 1 - *branch and bound*, incluindo um passo a mais antes da ramificação, que é a inclusão ou não de um novo plano de corte.

Algoritmo 2 Método de *branch-and-cut*

```

1: procedure BRANCH-AND-CUT
2:    $nós \leftarrow \{nó_0\}$ 
3:    $\underline{z} \leftarrow -\infty$ 
4:    $x^* \leftarrow \emptyset$ 
5:   seja  $S$  o conjunto de soluções de  $PI$ 
6:   while  $nós \neq \emptyset$  do
7:     escolha e remova um nó  $nó_i$  de  $nós$ 
8:      $PL_i \leftarrow \text{RELAXACAO-LINEAR}(PI_i)$ 
9:     if  $\text{RESOLVE}(PL_i)$  não é viável then
10:      continue
11:     else
12:        $x^i \leftarrow \text{SOLUCAO-OTIMA}(PI_i)$ 
13:        $z_i \leftarrow \text{VALOR-SOLUCAO}(PI_i)$ 
14:       if  $z_i \leq \underline{z}$  then
15:         continue
16:       else
17:         if  $x^i \in \mathbb{N}$  then
18:            $x^* \leftarrow x^i$ 
19:            $\underline{z} \leftarrow z_i$ 
20:         else ▷ verifica se adiciona cortes antes de ramificar
21:           if  $\text{ADICIONA-MAIS-CORTES}=\text{VERDADEIRO}$  then
22:              $\text{ADICIONA-CORTES}$ 
23:             vá para linha 9
24:           escolha um valor  $j$  tal que  $x_j^i \notin \mathbb{N}$ 
25:            $S_{i_1} := S_i \cap \{x : x_j \leq \lfloor x_j^i \rfloor\}$ 
26:            $S_{i_2} := S_i \cap \{x : x_j \geq \lceil x_j^i \rceil\}$ 
27:           sejam  $PI_{i_1}, PI_{i_2}$  e  $nó_{i_1}, nó_{i_2}$  referentes a  $S_{i_1}$  e  $S_{i_2}$ 
28:           adicione  $nó_{i_1}$  e  $nó_{i_2}$  a  $nós$ 
29:   return  $x^*$ 

```

Fonte: Adaptado de Conforti, Cornuejols e Zambelli (2014)

3 O Problema do Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos Tributada

Este capítulo visa elucidar os conceitos, regras e métodos inerentes a otimização de um Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos Tributada. Os pontos abordados são divididos em três áreas, sendo a primeira uma explanação do que é o Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos e qual a sua importância. A segunda trata das particularidades da tributação brasileira e seu impacto sobre o projeto de rede. A terceira parte realiza um panorama sobre os principais métodos e métricas utilizados para a otimização de redes e problemas similares.

3.1 Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos

Chopra e Meindl (2012) apontam alguns pontos importantes sobre o papel do projeto de rede de cadeia de suprimentos.

- Qual deve ser o papel das instalações? Quais os processos que ela deve realizar?
- Onde as instalações devem estar localizadas?
- Quanta capacidade deve ser alocada a cada uma das instalações?
- Quais mercados cada instalação deve atender e quais fornecedores são a origem para a cadeia de suprimentos?

As respostas para essas perguntas podem ser encontradas através do estudo e otimização do projeto de rede de cadeia de suprimentos.

O papel da instalação deve ser decidido antes da otimização, porém faz parte do estudo do projeto de rede. A função da instalação é uma decisão estratégica do projeto, sendo uma entrada para o modelo de otimização. Cada tipo de instalação tem uma característica e responsabilidade distinta, como um Centro de Distribuição, um Ponto de Passagem (*transit point*), um Centro de Processamento Cruzado (*cross docking*) entre outros.

A decisão da localização da instalação é de longo prazo, visto que a abertura ou o fechamento de uma instalação possui um custo elevado. A capacidade ou o tipo de processo de cada instalação podem ser alterados em um período de tempo menor, caso isto tenha sido previamente planejado. Capacidade muito alta pode gerar ociosidade e custos mais

elevados, enquanto que capacidades mais baixas tendem a ser mais baratas porém com pouca responsividade.

Segundo Chopra e Meindl (2012), "As decisões do projeto de rede devem ser revistas à medida que uma empresa cresce ou quando duas empresas se unem". Cabe ao presente trabalho expor, além desses casos, outros momentos oportunos para decisões de um projeto de rede, como alteração na demanda, alteração de fornecimento ou modificação na carteira de produtos. Como exemplo pode-se citar as empresas do setor agrícola, que podem mudar a estrutura da rede de acordo com os resultados da safra ou de negociações realizadas com os produtores para aquela safra.

As mudanças e decisões do projeto de rede não se referem somente à localização das instalações, mas também a quais fluxos são utilizados para o transporte dos produtos, de forma que o caminho e a quantidade de produtos que percorrem pela rede, desde o fornecedor até o cliente, fazem parte da decisão do projeto de rede de cadeia de suprimentos. Um exemplo de um fator de decisão importante para o fluxo da rede são os impostos estaduais, cujas alíquotas e mecânicas de tributação variam conforme a origem, destino e tipo de produto que passa pelos fluxos.

Custos de Transporte

O custo de transporte é o frete associado a um determinado produto quando este é transportado de um ponto a outro. Na Gestão da Cadeia de Suprimentos, este custo geralmente é definido como o valor gasto para se transportar uma tonelada de mercadoria (R\$/tonelada). Essa medida de frete é influenciada por variáveis como:

- Km da rota;
- Tipo de carga, e.g. carga seca, à granel, frigorificada, líquida etc.;
- Se o frete é carga cheia ou carga fracionada;
- O perfil do veículo, que define a quantidade de carga que um veículo pode carregar. Como regra geral, quanto mais carga um veículo pode carregar, mais barato é o valor do R\$/ton.

Custos de Armazenagem

Nos custos de armazenagem estão todos os custos referentes à instalação. Para efeito de simplificação, os custos serão separados apenas em duas parcelas:

- Custo fixos: ocorre apenas se a instalação for utilizada pela rede e, caso ocorra, é pago em sua totalidade.
- Custo variável: incide sobre cada unidade que passa pela instalação. Quanto maior quantidade de produtos que passam pela instalação, maior a soma dos custos variáveis.

3.2 O impacto da tributação brasileira no Projeto de Redes de Cadeia de Suprimentos

Além dos custos logísticos, os custos tributários possuem grande relevância na escolha da localização de uma instalação e na definição de quais caminhos o fluxo de produtos irá percorrer, desde o fornecedor até o cliente final.

Diversos impostos incidem sobre os produtos durante o seu transporte pela cadeia logística, sendo que o valor recolhido de alguns desses impostos pode variar de acordo com o caminho que ele percorre, enquanto que outros são cobrados em igual medida independente do caminho. Como regra geral, os impostos estaduais são cobrados de forma diferenciada de acordo com o caminho que o produto percorre, e os impostos federais são cobrados da mesma forma independente do caminho percorrido.

Dentre os impostos, o ICMS, que pode ser visto em detalhe na seção 3.2.2, é o que possui maior impacto na escolha de instalações e rotas, sendo este o principal imposto estadual. Os estados podem atribuir alíquotas e mecânicas diferentes para os produtos que transitam em seu território, o que forma uma competição de tributação entre os estados que é popularmente conhecida como “guerra fiscal”.

3.2.1 Impostos Federais

Os impostos federais, por não mudarem de acordo com o localização do armazém ou fábrica, não possuem influência direta na composição do Projeto de Rede de Cadeira

de Suprimentos. Porém é importante citá-los, pois constituem a base de cálculo de outros impostos, como o ICMS, presente na seção 3.2.2.

Os seguintes impostos federais estão presentes na base de cálculo do ICMS:

- PIS: Programa Integração Social.
- CONFINS: Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social.
- IPI: Imposto sobre Produtos Industrializados.

3.2.2 Impostos Estaduais

ICMS - Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

O ICMS é um tributo estadual que incide sobre a circulação de mercadorias e serviços. Apesar de ser um imposto pago durante toda a circulação, trata-se de um imposto não cumulativo, que é pago pelo consumidor mas atribui a responsabilidade de recolhimento às empresas, ou seja, a empresa paga o imposto para o estado que repassa o valor para o consumidor. O ICMS está previsto no art. 155 da constituição federal de 1988 com diversas leis complementares, sendo a mais conhecida a lei complementar 87/96, conhecida como Lei Kandir.

Por ser recolhido em toda a cadeia e não cumulativo, o ICMS possui um sistema de débitos e créditos, onde o valor do ICMS já pago na compra da mercadoria (crédito) pode ser abatido no ICMS cobrado na venda (débito). Como regra geral, o recolhimento do ICMS é sempre realizado na origem. O ICMS possui alíquotas diferentes para cada par de [UF de origem]:[UF de destino]. Quando a origem e o destino estão localizados em UFs distintas, essas alíquotas são chamadas de alíquotas externas (ou interestaduais) e variam de 7% a 12%. Quando a origem e o destino estão localizados na mesma UF, aplica-se a alíquota interna (ou intra-estadual), que é mais alta do que a alíquota externa, variando de 17% a 20% já incluindo o valor do FCP (Fundo de Combate a Pobreza), que é aplicado nos estados do RJ (2%) e de AL (1%). Quando se trata de uma operação de um produto importado, a alíquota cobrada é sempre 4%, exceto para operações de venda ao consumidor final, conforme a Resolução Federal no. 13/2012. Sempre que houver operações de transferência ou de venda entre dois estabelecimentos ocorrerá a incidência de ICMS. Na transferência, onde a origem e o destino pertencem a mesma empresa, as mercadorias são tributadas com base em seu preço de custo. Nas operações de venda, cujo destino são

outras empresas, é acrescido o lucro da empresa de origem no valor da mercadoria, sendo assim considerado o valor de venda do produto para composição da base de cálculo do ICMS. O cálculo do ICMS é feito “por dentro”, ou seja, a alíquota incide sobre o valor final da nota, sendo calculado da seguinte forma:

$$ICMS = \frac{\text{Valor do Produto}}{(1 - \%ICMS - \%PIS - \%COFINS - \%IPI)} \cdot \%ICMS \quad (7)$$

Onde:

$\%ICMS$ é a alíquota de ICMS.

$\%PIS$ é a alíquota de PIS.

$\%COFINS$ é a alíquota de COFINS.

$\%IPI$ é a alíquota de IPI.

Um exemplo de como o saldo de ICMS é calculado, pode ser visto na subseção 5.2.4, que demonstra a construção da restrição para o modelo de programação inteira proposto por este trabalho, que minimiza o saldo de ICMS em cada UF.

3.2.3 Benefícios Fiscais

Os governos estaduais, em um esforço para atrair grandes empresas a fim de gerar empregos e renda, oferecem incentivos fiscais para empresas e setores de seu interesse. Os benefícios fiscais podem ter diferentes mecânicas de funcionamento, que podem complementar a mecânica tradicional de crédito e débito, ou substituí-la completamente.

Convênios

Os convênios possuem decisão unânime dos estados representados e pelo DF, eles contemplam a redução da base de cálculo, a devolução do ICMS, créditos presumidos e quaisquer outros incentivos fiscais que resultem na redução ou eliminação do imposto. O fórum regulador é o CONFAZ, Conselho Nacional de Política Fazendária.

Objetivando o desenvolvimento interno, alguns estados concediam incentivos fiscais, como crédito presumido e reduções de base de cálculo, sem o amparo de convênios. Os estados que eram prejudicados, além de proporem medidas judiciais, exigiam de seus contribuintes o estorno dos créditos oriundos de estados com benefícios “ilegais”. Esse

conflito de interesse entre os estados impediam a celebração de Convênios sobre incentivos regionais.

Convalidação

A lei complementar 160/2017, que convalida os incentivos fiscais relativos ao ICMS concedidos “ilegalmente” pelos estados a empresas e indústrias tem por objetivo reduzir a guerra fiscal, criando regras mais flexíveis para os incentivos fiscais. Ela também garante que os empreendimentos, que já contam com esses benefícios fiscais tidos como ilegais, continuem a receber os benefícios acordados. A lei complementar mapeia e torna visível para todos os estados quais são os benefícios de cada estado e proíbe a prática de benefícios fora de convênios.

3.2.4 Exemplos de tipos de benefícios fiscais

Como mencionado no início desta seção, os benefícios fiscais podem ter diversas mecânicas de acordo com a UF que o aplica, bem como o tipo de produto para o qual o benefício é concedido. Todavia, existem alguns tipos de benefícios fiscais que são mais comuns:

- Redução de base de cálculo: Redução da carga tributária para produtos ou serviços específicos, como defensivos agrícolas, sementes, produtos de cesta básica etc.
- Isenção de ICMS: Isenção da carga tributária para produtos ou serviços específicos, como por exemplo produtos hortifrutigranjeiros em SP, estendendo o benefício a frutas, verduras e hortaliças que estejam embaladas ou resfriadas, mesmo que tenham sido cortadas ou descascadas. Um exemplo de isenção de ICMS é o caso de alguns medicamentos, que possuem isenção em PB conforme o decreto 23.210/02.
- Crédito Presumido: Liberação de um crédito de ICMS a ser apurado na saída da operação, abatido dos débitos e apresentando um recolhimento efetivo do ICMS inferior ao valor destacado na Nota Fiscal de Venda. Seu objetivo é reduzir a burocracia e ao mesmo tempo oferecer um desconto no pagamento do ICMS. Ao mesmo tempo que o crédito presumido oferece um desconto de ICMS na saída da mercadoria, ele obriga a empresa a abrir mão dos créditos de ICMS na entrada, seja

de forma parcial ou total, de forma que o desconto oferecido na saída seja maior do que os créditos perdidos na entrada. Como exemplo podemos citar o PRODEPE (Programa de Desenvolvimento do Estado de Pernambuco) que utiliza este tipo de benefício fiscal.

Este trabalho visa, como uma de suas contribuições, propor um modelo de otimização para um projeto de rede de cadeia de suprimentos que, além do cálculo de ICMS, abranja também os principais benefícios fiscais citados nos exemplos acima. Em particular a parte do modelo que visa o crédito presumido está descrita na subseção 5.2.5.

3.2.5 ICMS-ST: Substituição Tributária do ICMS

Quando a cadeia de distribuição está dentro de um mesmo estado, a Substituição Tributária (ICMS-ST) facilita a arrecadação do ICMS pelo estado, que passa a arrecadar o valor do tributo uma única vez no início da cadeia, o que reduz a evasão fiscal. Diferente do ICMS que é recolhido na UF de origem, ICMS-ST é recolhido pela UF de destino. Caso ocorra uma venda para outro estado, o vendedor poderá pedir o ressarcimento do valor pago da ST na aquisição da mercadoria. O estado pressupõe uma determinada margem de lucro para cada tipo de produto através do MVA (Margem de Valor Agregado), e usa o MVA para o cálculo da ST.

$BC_{ICMS-ST}$: Base de cálculo do ICMS ST.

VNF : Valor da Nota Fiscal do produto com impostos (ICMS, PIS, COFINS, IPI)

$\%MVA$: percentual aplicado para a Margem de Valor Agregado.

$\%ICMS_{interno}$: Alíquota interna de ICMS.

$ICMS$: valor do ICMS da operação.

$$BC_{ICMS-ST} = VNF \cdot (1 + \%MVA)$$

$$ICMS-ST = BC_{ICMS-ST} \cdot \%ICMS_{interno} - ICMS$$

3.2.6 Difal

O DIFAL, ou diferencial de alíquotas do ICMS, é usado quando a operação de venda entre estados tem como destino um consumidor final — ou seja, quando o comprador não irá revender o produto — e está situado em uma UF diferente do vendedor. O DIFAL

ocorre porque a alíquota cobrada de um consumidor final, antes da expansão do comércio eletrônico, era predominantemente a alíquota interna da UF onde está o comprador. Com o aumento do comércio eletrônico, muitas empresas passaram a vender de fora da UF onde está o consumidor para assim pagar alíquotas interestaduais, que são menores do que as internas. O DIFAL surgiu para equilibrar as contas, de forma que a carga tributária final seja a mesma independente se a operação de venda é uma operação entre diferentes UFs ou dentro da mesma UF. De acordo com o Emenda Constitucional 93/2015, o DIFAL é aplicado tanto para consumidor final contribuinte de ICMS, quanto para o consumidor final não contribuinte. O cálculo do DIFAL consiste na diferença de carga tributária entre a operação interestadual e a operação interna.

Considerando uma operação de venda, saindo da UF A com destino a UF B, tem-se um exemplo para o cálculo do DIFAL conforme abaixo.

- Valor do produto: 100
- Alíquota de ICMS interestadual de A para B: 12%
- Alíquota de ICMS interna de B para B: 17%
- PIS, CONFINS e IPI: para simplificar o exemplo, não serão incluídas as alíquotas de impostos federais.

$$ICMS_{AB} = \frac{\text{Valor do Produto}}{(1-\%ICMS_{AB})} \cdot \%ICMS_{AB} = \frac{100}{(1-0,12)} \cdot 0,12 = 13,64$$

$$ICMS_{BB} = \frac{\text{Valor do Produto}}{(1-\%ICMS_{BB})} \cdot \%ICMS_{BB} = \frac{100}{(1-0,17)} \cdot 0,17 = 20,48$$

$$DIFAL_{AB} = 20,48 - 13,64 = 6,84$$

No caso de uma operação interna para consumidor, seria pago apenas o ICMS interno de 20,48. Já no caso de uma operação interestadual, seriam pagos os valores do ICMS interestadual de 13,64 mais o DIFAL de 6,84, resultando em um valor final de 20,48, que é o mesmo valor pago na operação interna da UF B.

3.2.7 O problema dos circuitos tributários

Existe um caso especial onde o desenho tributário pode ocasionar a existência de circuitos dentro do desenho de rede logístico tributário. Esse caso ocorre devido ao modelo de créditos de débitos do ICMS, onde os produtos podem ir e vir “múltiplas vezes” entre duas localidades com o objetivo de realocar o crédito gerado em uma UF para outra UF,

onde a primeira UF gera mais créditos do que débitos, ou seja, possui um saldo credor e esse crédito não pode ser utilizado. Se existir uma diferença de alíquotas entre os arcos desta UF com uma outra UF qualquer, onde o saldo final é um débito e a alíquota de ida é maior do que a alíquota de volta, existe a possibilidade de realocação de crédito.

Para exemplificar, são dadas duas UFs, A e B , que possuem alíquotas conforme a tabela 1.

Tabela 1 – Parametrização tributária geradora de circuitos.

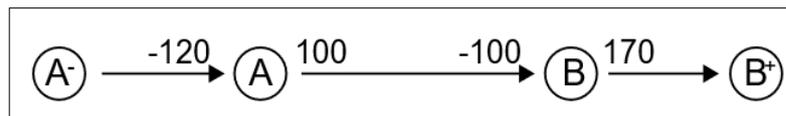
Operação	origem	destino	alíquota
Aquisição	A^-	A	12%
Transferência	A	B	10%
Transferência	B	A	7%
Distribuição	B	B^+	17%

Fonte: Estível Ramos Jr.

Onde A^- é o conjunto de localidades que não estão na UF A e que enviam produtos para uma localidade na UF A e são rotas de aquisição de mercadorias. B^+ é o conjunto de todas as localidades que recebem de B e são rotas de distribuição de mercadorias, ou seja, vendas ao consumidor final.

Considerando um volume financeiro de R\$1000 em mercadorias, em um desenho de rede sem circuitos teríamos um imposto calculado conforme a figura 11 e as tabelas 2 e 3.

Figura 11 – Grafo da rede sem circuitos



Fonte: Estível Ramos Jr.

Tabela 2 – Arcos e custos do grafo sem circuitos

Operação	Org	Dest	Alíquota	Valor circulado (R\$)	Imposto (R\$)
Aquisição	A^-	A	12%	1000	120
Transferência	A	B	10%	1000	100
Distribuição	B	B^+	17%	1000	170

Fonte: Estível Ramos Jr.

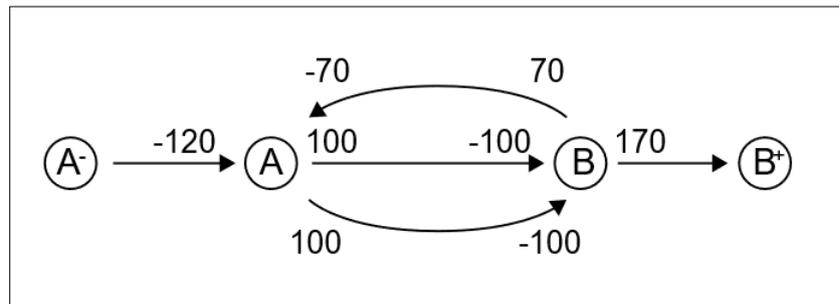
Observa-se no exemplo acima o saldo total da tabela 3, que indica um custo final de 70 (como se trata de um modelo de custos, valores negativos são créditos e positivos são débitos). Este seria o desenho de malha correto, porém o modelo de créditos e débitos pode gerar um circuito entre as UFs A e B , minimizando o saldo total, de R\$70 para R\$50, conforme exemplificado na figura 12 e as tabelas 4 e 5.

Tabela 3 – Saldo de ICMS sem circuitos

UF	Créditos	Débitos	Saldo
A	120	100	-20
B	100	170	70
Total			70

Fonte: Estível Ramos Jr.

Figura 12 – Grafo da rede com circuitos



Fonte: Estível Ramos Jr.

Tabela 4 – Arcos e custos do grafo com circuitos

Operação	Org	Dest	Alíquota	Valor circulado (R\$)	Imposto (R\$)
Aquisição	A-	A	12%	1000	120
Transferência	A	B	10%	1000	100
Transferência	B	A	7%	1000	70
Distribuição	B	B+	17%	1000	170

Fonte: Estível Ramos Jr.

Tabela 5 – Saldo de ICMS com circuitos

UF	Créditos	Débitos	Saldo
A	190	200	10
B	200	240	40
Total			50

Fonte: Estível Ramos Jr.

Apesar da criação desse circuito extra seja matematicamente possível, ela não pode ser implementada em uma operação logística real, pois para que o volume dos arcos ocorra, seria necessário que a mesma mercadoria transite em circuitos, porém essa manobra seria ilegal e logisticamente ineficiente.

Desta forma, é necessário incluir um mecanismo que impeça que esse tipo de estrutura aconteça. Tal restrição será abordada na seção 5.2.9.

4 Revisão Bibliográfica

4.1 *Protocolo*

4.1.1 Objetivo

Identificar e analisar os métodos, técnicas e métricas existentes para otimização de custos do Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos Tributada.

4.1.2 Questões de pesquisa

- Principais categorias de modelos consideradas nos problemas de otimização de um Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos.
- Quais métodos de Programação Inteira são utilizados para a otimização de um Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos, em um problema complexo, com diversas variáveis e restrições,
- Quais métricas são adotadas para avaliação de resultados.

4.1.3 Controle

Teses, artigos e dissertações sobre otimização de custos do Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos com Tributação, através de Programação Inteira

4.1.4 Resultados

Visão profunda e abrangente dos métodos, técnicas e métricas existentes para otimização de um Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos.

4.1.5 Seleção de fontes

Fontes disponíveis via web, preferencialmente em bases de dados científicos da área. Também podem ser selecionados trabalhos disponíveis em outros meios, desde que atendam aos requisitos da Revisão Sistemática, podendo estar redigidas em inglês e português.

4.1.6 Palavras-chaves

Para bases internacionais: supply chain, optimization, network flows, integer programming, fixed-charge network flow.

Para bases nacionais: malha logística, rede de distribuição, projeto de rede, cadeia de suprimentos, programação inteira, icms.

4.1.7 Listagem de fontes

Serão considerados estudos conduzidos com profissionais ou estudantes das áreas de otimização inteira e supply chain das seguintes fontes:

- SCOPUS (<http://www.scopus.com/home>)
- Google Scholar (<https://scholar.google.com>)

4.1.8 Critérios de inclusão e critérios de exclusão dos trabalhos

Para avaliar os artigos, são utilizados critérios de inclusão e critérios de exclusão para cada *string* de busca, conforme a tabela 1.

4.1.9 Critérios de qualidade dos estudos primários

Para as *strings* de busca que, após passarem pelos critérios de inclusão e exclusão, contemplarem mais de 10 publicações será aplicada uma pontuação segundo os critérios de qualidade abaixo, onde a maior pontuação é melhor:

- Conferência; Periódico; (1;2)
- Classificação Qualis (1-4)

4.2 Condução da Revisão Sistemática

Quadro 1 – Resumo da condução da revisão sistemática antes de aplicar os critérios de qualidade

Fonte	Data da Busca	String Utilizada	Período	Critérios de Inclusão e Exclusão	Quant. de artigos
Scopus	3/5/2020	“supply chain” AND “integer programming” AND “multi-echelon”	2015 a 2020	(I) minimização de custos de supply chain	24
				(I) programação inteira	
				(E) métodos não exatos	11
				(E) método não linear	
(E) modelo com 2 níveis ou menos (echelons)					
Google Scholar	15/6/2020	“malha logística” OR “rede de distribuição” OR “cadeia de suprimentos” AND “programação inteira” AND “icms”	2015 a 2020	(I) minimização de custos de redes de cadeia de suprimentos	5
				(I) programação inteira	
				(E) Exclui custo tributário	11
				(E) método não linear	
Scopus	25/6/2020	“charge network flow”	2015 a 2020	I) Aborda o fixed-charge network flow problem	5
				(I) programação inteira	
				(E) método não linear	3
				(E) Não Aborda o fixed-charge network flow problem	3

Fonte: Estível Ramos Jr.

4.2.1 Artigos selecionados

Após a condução da revisão sistemática e a aplicação de critérios de qualidade, foram selecionados 13 artigos, enumerados a seguir.

1. Designing a green meat supply chain network: A multi-objective approach. (MOHEBALIZADEHGASHTI; ZOLFAGHARINIA; AMIN, 2020)
2. Sustainable supply chain network design for the optimal utilization of municipal solid waste. (MOHAMMADI; JÄMSÄ-JOUNELA; HARJUNKOSKI, 2019)
3. Lagrangian relaxation for the time-dependent combined network design and routing problem (PAPADIMITRIOU; FORTZ; GORGONE, 2015)
4. A Integer Programming Model for Multi-Echelon Supply Chain Decision Problem Considering Inventories. (HARAHAP *et al.*, 2018)
5. A decision model for a strategic closed-loop supply chain to reclaim End-of-Life Vehicles. (SHANKAR; BHATTACHARYYA; CHOUDHARY, 2018)
6. A Influência do Planejamento Tributário no Desenho da Rede de Distribuição e na Localização de Centros de Distribuição. (SANTO, 2015)
7. Otimização da configuração de cadeia de suprimentos com análise complementar de competitividade dos cenários. (LAUTERBACH, 2017)
8. Desenho de redes de suprimentos com o auxílio de planilha eletrônica e simulação computacional (SANTOS *et al.*, 2018)
9. Modelagem integrada para otimização da cadeia logística de combustíveis no Brasil. (LEAL, 2018)
10. Valid inequalities for the single arc design problem with set-ups. (AGRA; DOOST-MOHAMMADI; LOUVEAUX, 2015)
11. A relax and fix approach to solve the fixed charge network design problem with user-optimal flow (GONZÁLEZ *et al.*, 2015)
12. Alternative mixed-integer linear programming models of a maritime inventory routing problem. (JIANG; GROSSMANN, 2015)
13. MIP neighborhood search heuristics for a capacitated fixed-charge network design problem. (KATAYAMA, 2020)

4.2.2 Comparativo dos artigos selecionados

Após a seleção é realizada uma comparação entre os artigos, de forma a verificar as principais semelhanças e diferenças entre eles. A tabela 2 retrata os tipos de modelo, objetivos, e categorias de problema para cada um dos artigos. A tabela 3 informa quais os tipos de instância. E a tabela 4 fornece informações sobre os resolvedores utilizados.

No quadro 2 pode-se observar que os objetivos abordados, em sua maioria, estão focados na minimização de custos (10 de 13), seguidos da maximização de lucros (2 de 13), e por último um problema com função multi objetivo (1 de 13).

Quadro 2 – Tipos de modelos e categorias de problema abordados pelos artigos selecionados na revisão sistemática.

Artigo	Tipo de modelo	Objetivo	Problema
1	PLIM multi objetivo	1. minimizar custo de transporte; 2. minimizar a emissão de CO ₂ ; 3. maximizar a utilização das capacidades das instalações	Projeto de Redes de Suprimentos
2	PLIM	Minimizar o custo total da rede da cadeia de suprimentos	Projeto de Redes de Suprimentos
3	PLIM	minimizar o custo total	Problema de Projeto de Rede Tempo-Dependente Combinado e Roteirização
4	PLIM	minimizar o custo total	Decisão Multi-Nível de Cadeia de Suprimentos
5	PLIM	maximizar lucro	Cadeia de Suprimentos de Ciclo fechado
6	PLIM	minimizar o custo total	Modelo de Localização de Instalações com
7	PLIM	minimizar o custo total	Localização de Instalações Extendido
8	PLI	minimizar o custo total	Projeto de Redes de Suprimentos
9	PLIM	maximizar lucro	Projeto de Redes de Suprimentos
10	PLIM	minimizar o custo total	1. Vértice Único com Custo Fixo 2. Projeto de Arco Único
11	PLIM	minimizar o custo total	Projeto de Rede Não Capacitado com Custo Fixo
12	PLIM	minimizar o custo total	Problema de roteirização de estoque marítimo
13	PLIM e heurística	minimizar o custo total	Projeto de Rede Capacitado com Custo Fixo

Fonte: Estível Ramos Jr.

O quadro 3 expõe informações sobre as instâncias utilizadas, e os tipos de instância revelam qual a ênfase do trabalho e qual tipo de variação pode-se esperar dos modelos propostos. Um dos pontos mais importantes que pode-se inferir pela revisão é quais trabalhos utilizam bases de dados com tributação, que é o caso dos trabalhos 6, 7, 8 e 9. Trabalhos com dados reais e projetos de rede multi-níveis também possuem forte ligação com o presente estudo, enquanto que trabalhos multi-período foram pospostos.

Quadro 3 – Tipos de instâncias dos artigos selecionados na revisão sistemática.

Artigo	Dados reais	Multi-nível	Multi-período	Aborda tributação
1	sim	sim	sim	não
2	sim	sim	sim	não
3	não	sim	sim	não
4	não	sim	sim	não
5	não	sim	sim	não
6	sim	não	não	sim
7	sim	sim	sim	sim
8	não	não	não	sim (cenários)
9	sim	sim	não	sim
10	não	não	sim	não
11	não	sim	não	não
12	não	sim	sim	não
13	não	não	não	não

Fonte: Estível Ramos Jr.

O quadro 4 revela quais foram os resolvedores utilizados em cada trabalho, bem como apresenta quais deles registraram métricas de desempenho em relação ao tempo de resolução. Como podemos ver, não é incomum que trabalhos nessa linha de pesquisa não estabeleçam métricas de desempenho, uma vez que nesses casos, o resultado do trabalho é o próprio resultado da otimização, tanto em relação a menores custos como em relação ao projeto de rede logística proposto pelo resultado do modelo.

Quadro 4 – Resolvedores de PLIM e estratégias utilizadas para otimização pelos artigos selecionados na revisão sistemática.

Artigo	Programa resolvidor de PLIM	Inclui métricas de desempenho
1	LINGO	não
2	GAMS/CPLEX	sim
3	CPLEX	sim
4	-	não
5	LINGO	não
6	FICO Xpress-Optimizer	não
7	CPLEX e AIMMS	não
8	anyLogistix e resolvidor do excel	não
9	GUROBI	não
10	Xpress-Optimizer	sim
11	FICO Xpress Optimization	sim
12	CPLEX	sim
13	GUROBI + heurística	sim

Fonte: autor

5 Construção do modelo de programação linear inteira

A partir do problema Projeto de Rede Multiproduto de Custo Fixo Capacitado (*Multicommodity Capacitated Fixed-Charge Network Design*) definido por Magnanti e Wong (1984), será desenvolvido neste capítulo um modelo para resolver o problema de um Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos Tributada, em especial os custos de ICMS. A seção 5.1 apresenta o modelo de Magnanti e Wong (1984) que é utilizado como base para a construção de um novo modelo na seção 5.2, bem como para a aplicação dos custos de uma cadeia de suprimentos com tributação; a seção 5.3 expõe o modelo proposto ao final do capítulo.

5.1 Projeto de Rede Multiproduto de Custo Fixo Capacitado.

Como o problema do Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos Tributada é uma variação do problema de Projeto de Rede Multiproduto de Custo Fixo Capacitado, convém definir este problema e sua formulação em um modelo de Programação Inteira Mista. Este problema consiste em encontrar o menor custo de transporte e localização, para diversos produtos, através de um desenho de rede ótimo que respeite as capacidades dos fluxos. Tomando como referência o modelo de Magnanti e Wong (1984) pode-se expressar este problema através do seguinte modelo de programação inteira:

Um grafo orientado $G = (A, V)$ define todos os fluxos possíveis para a rede, onde A é o conjunto de arcos e V é o conjunto de vértices. Cada arco (i, j) é uma conexão que sai do vértice i em direção ao vértice j e, a cada arco, existem duas variáveis associadas. A primeira variável x_{ij} é uma variável inteira, tal que $x_{ij} \in \{0, 1\}$. Ela indica se o arco (i, j) está sendo utilizado ($x_{ij} = 1$) ou não ($x_{ij} = 0$), e é multiplicado por um custo fixo indicado pela constante a_{ij} . A segunda variável y_{ij}^s é uma variável contínua, tal que $y_{ij}^s \in \mathbb{R}^+$. Ela indica o fluxo que passa pelo arco (i, j) e é multiplicada por um custo variável b_{ij}^s , sendo s um índice que identifica os produtos.

O conjunto S define os produtos que circulam pela rede, de forma que cada produto $s \in S$ possui uma demanda específica d^s a ser entregue no vértice de destino $D(s)$ à partir de seu vértice de origem $O(s)$.

O conjunto $N^+(j)$ contém todos os vértices que são origem dos arcos que possuem destino em j , enquanto que o conjunto $N^-(j)$ contém todos os vértices que são destino dos arcos que possuem origem em i . Cada arco (i, j) possui uma limitação de capacidade c_{ij} .

Desta forma, define-se o modelo de programação inteira como:

$$\min \sum_{(i,j) \in A} a_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{s \in S} b_{i,j}^s \cdot y_{ij}^s \quad (8)$$

Sujeito a

$$\sum_{i \in N^+(j)} y_{ij}^s - \sum_{i \in N^-(j)} y_{ji}^s = \begin{cases} -d^s & , \text{ se } j \in O(s) \\ d^s & , \text{ se } j \in D(s) \\ 0 & , \text{ para os demais casos} \end{cases} , \forall s \in S, j \in V \quad (9)$$

$$\sum_{s \in S} y_{ij}^s \leq c_{ij} \cdot x_{ij} , \forall (i, j) \in A \quad (10)$$

A equação (9) garante que o balanço de massa em cada vértice seja respeitado. Ela também atribui a demanda para os vértices dos clientes, onde $i = D(s)$, e atribui o fornecimento do produto para os vértices das fábricas, indicado por $i = O(s)$.

A restrição de capacidade é definida de tal forma que os fluxos de todos os produtos, para o mesmo par (i,j) , não podem ser maiores do que a capacidade daquele arco, conforme a inequação (10).

5.2 Desenvolvimento do modelo e atribuição de custos

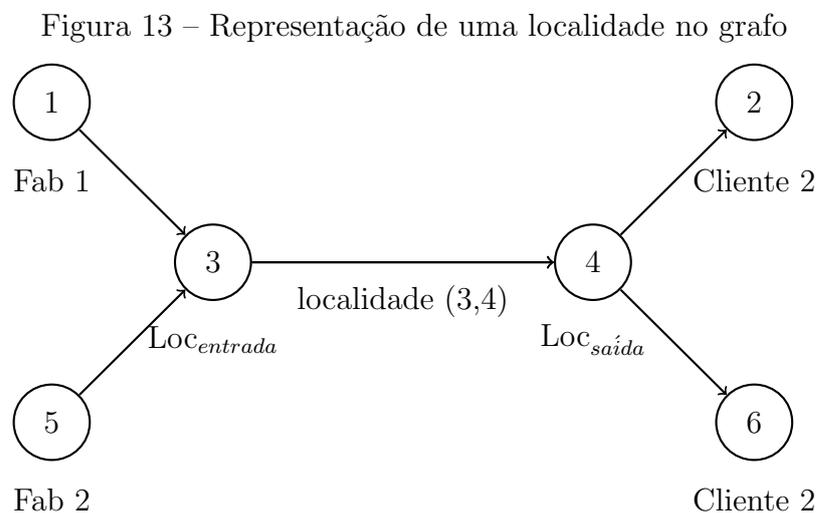
5.2.1 Abertura da demanda por vértice

A partir do modelo de Magnanti e Wong (1984) é feita uma alteração na restrição (9), de maneira que a demanda seja diferenciada não somente por sku, mas também de acordo com o vértice, tal alteração também é considerada por Gendron, Crainic e Frangioni (1999). Assim, acrescenta-se o índice de vértices à constante de demanda, de forma que a equação (9) é substituída pela equação (11).

$$\sum_{i \in N^+(j)} y_{ij}^s - \sum_{k \in N^-(j)} y_{jk}^s = \begin{cases} -d_j^s & , \text{ se } j \in O(s) \\ d_j^s & , \text{ se } j \in D(s) \\ 0 & , \text{ para os demais casos} \end{cases} \quad , \forall s \in S, j \in V \quad (11)$$

5.2.2 Representação de Localidades

O modelo de Magnanti e Wong (1984) possui custos e capacidades somente atribuídos aos arcos, sem nenhum custo ou capacidade atribuído aos vértices. Portanto, os custos e capacidades das localidades não são representados por vértices, mas sim por arcos. Essa representação é feita sem que haja modificação no modelo original mas sim através da construção do grafo da rede, conforme a representação de localidades descrita na figura 13, que representa duas atribuições diferentes para os arcos do grafo (transporte e localidade), sendo que os arcos (1,3), (5,3), (4,2) e (4,6) são arcos de transporte, e o arco (3,4) é um arco de localidade.



Fonte: Estível Ramos Jr.

5.2.3 Atribuição de custos e capacidades logísticas

Os custos logísticos estão divididos em duas partes: a parcela de custos fixos e a parcela de custos variáveis. Para cada tipo de arco (transporte ou localidade), estes custos têm comportamentos diferentes. Na função objetivo (8), os custos fixos estão contidos na constante a_{ij} que multiplica a variável binária x_{ij} ; já os custos variáveis são parametrizáveis através da constante b_{ij}^s , que multiplica a variável contínua y_{ij}^s , que é o fluxo do arco (i, j) para o produto s .

Para os arcos de transporte são definidos apenas os custos variáveis, que são os custos de frete, parametrizados conforme o tipo de transporte e o tipo de carga, não sendo atribuído nenhum custo fixo.

Para os arcos de localidades, custos fixos e variáveis são atribuídos. O custos fixos são o mínimo gasto para que a localidade permaneça aberta; os custos variáveis são custos relacionados à operação e manutenção da localidade em função da quantidade de produtos que por ela passa.

Os arcos de localidades possuem uma capacidade máxima associada que é definida através da restrição descrita na inequação (10), e os arcos de transporte não possuem capacidade máxima.

Portanto, pode-se resumir as atribuições de capacidade e custos para cada tipo de arco conforme a tabela abaixo.

Tabela 6 – Custos e capacidades atribuídos para cada tipo de arco.

Tipo de arco	Custo Fixo Logístico	Custo Variável Logístico	Capacidade
arco de transporte	não	sim	não
arco de localidade	sim	sim	sim

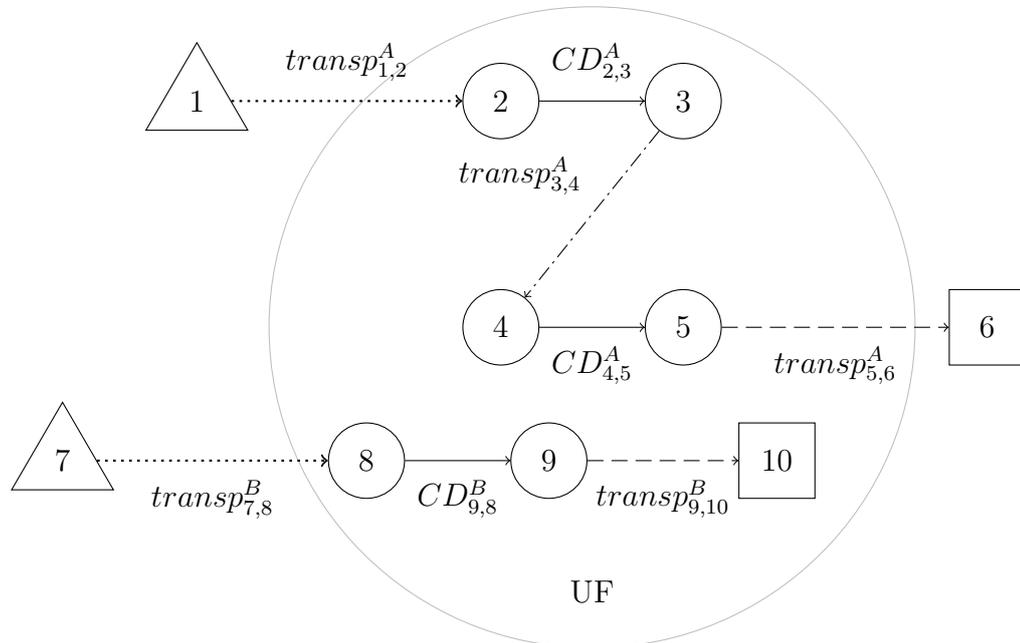
Fonte: Estivel Ramos Jr.

Na tabela acima, define-se CFL_{ij} como o Custo Fixo Logístico do arco (i, j) , CVL_{ij} como o Custo Variável Logístico do arco (i, j) , e CAP_{ij} como a Capacidade máxima de fluxo associada ao arco (i, j) . Desta forma, os custos da função objetivo (8) são descritos como $a_{ij} = CFL_{ij}$ e $b_{ij} = CVL_{ij}$. E as capacidades da restrição (10) ficam definidas como $c_{ij} = CAP_{ij}$.

5.2.4 Restrição e custos para o Saldo de ICMS

Por ter uma natureza não cumulativa, o ICMS possui um sistema de créditos e débitos que garante que o imposto pago anteriormente durante a cadeia de suprimentos não seja pago novamente. O ICMS é um imposto estadual, portanto o cálculo dos créditos e débitos é realizado de acordo com Unidade Federativa (UF), de modo que cada UF tem o seu próprio cálculo de saldo isolado das demais UFs. A figura 14 demonstra como o saldo de ICMS é calculado para uma determinada UF.

Figura 14 – Mecânica de saldo de ICMS considerando dois produtos (A, B)



Fonte: Estivel Ramos Jr.

-→ arcos de transporte que contabilizam apenas crédito
- arcos de transporte que contabilizam apenas débito
- .-.-→ arcos de transporte que contabilizam tanto débito como crédito.
- arcos de localidade, que não contabilizam nem crédito nem débito de ICMS.
- △ vértices que representam a saída de uma fábrica.
- vértices que representam a entrada de um cliente.
- vértices que representam a entrada ou saída de uma localidade.

Abaixo está a descrição de cada um dos vértices da figura 14, considerando que A e B são os produtos que transitam pela rede.

- (1) : Fornecedor do produto A; $s = A$; $(1) \in O(A)$;
- (2) : Entrada do Centro de Distribuição (2,3) do produto A;
- (3) : Saída do Centro de Distribuição (2,3) do produto A;
- (4) : Entrada do Centro de Distribuição (3,4) do produto B;
- (5) : Saída do Centro de Distribuição (3,4) do produto B;
- (6) : Cliente do produto A; $s = A$; $(6) \in D(A)$;
- (7) : Fornecedor do produto B; $s = B$; $(7) \in O(B)$;
- (8) : Entrada do Centro de Distribuição (8,9) do produto C;
- (9) : Saída do Centro de Distribuição (8,9) do produto C;
- (10) : Cliente do produto B; $s = B$; $(10) \in D(B)$.

Créditos e débitos de ICMS.

Como o ICMS é um imposto que incide sobre a circulação de produtos, consideram-se apenas os arcos de transporte para o cálculo do saldo de ICMS. Portanto, para o cálculo dos débitos e créditos, consideram-se as seguintes regras:

Créditos: ICMS cujos arcos de transporte (i, j) possuam $j \notin D(s) \forall s \in S$ e j está dentro da UF para o qual o saldo está sendo calculado. $D(s)$ é o conjunto de arcos de demanda do produto s , ou seja, os clientes. Exclui-se os arcos cujo destino são clientes porque o crédito gerado nesses arcos pertence ao cliente, e não à empresa que vende o produto.

Débitos: ICMS cujos arcos de transporte (i, j) possuem $i \notin O(s) \forall s \in S$ e i está dentro da UF para o qual o saldo está sendo calculado. Onde $O(s)$ é o conjunto de arcos de origem do produto s , ou seja, os fornecedores. Exclui-se os arcos cuja origem são fornecedores porque o débito gerado nesses arcos pertencem aos fornecedores, e não à empresa que compra o produto.

Deste modo, define-se os arcos de crédito através do conjunto $UF^-(u) = \{(i, j) \in A \mid i \in V, j \in UF(u), j \notin D(s) \forall s \in S\}$ e os arcos de débito através do conjunto $UF^+(u) = \{(i, j) \in A \mid i \in UF(u), j \in V, i \notin O(s) \forall s \in S\}$, onde $u \in U$, $U = \{u \mid u \text{ representa uma UF do Brasil}\}$ e $UF(u) = \{v \mid v \in V \text{ e } v \text{ está contido na UF } u\}$.

Uma vez definidos os arcos, calcula-se o valor do ICMS para todas as rotas de transporte, para cada produto, segundo a fórmula

$$icms(i, j, s) = \frac{VP_{ij}^s}{(1 - ICMSalqt_{ij}^s - PISalqt^s - COFINSalqt^s)} \cdot ICMSalqt_{ij}^s \quad (12)$$

, onde VP_{ij}^s é o valor do produto s na rota (i, j) ; $ICMSalqt_{ij}^s$ é alíquota de ICMS para o produto s na rota (i, j) ; $PISalqt^s$ é a alíquota de PIS para o produto s ; e $COFINSalqt^s$ é alíquota de COFINS para o produto s .

Saldo de ICMS

O valor calculado pela função (12), $icms(i, j, s)$, se refere a uma única unidade de produto e deve ser multiplicado pela quantidade do produto s que passa pelo arco (i, j) , quantidade esta que é representada pela variável de fluxo y_{ij}^s . Assim sendo, se estabelece o saldo de ICMS como

$$\sum_{ij \in UF^+(u)} \sum_{s \in S} icms(i, j, s) \cdot y_{ij}^s - \sum_{ij \in UF^-(u)} \sum_{s \in S} icms(i, j, s) \cdot y_{ij}^s, \forall u \in U \quad (13)$$

Quando a otimização for realizada, existe a possibilidade de uma determinada UF possuir um valor prévio de crédito acumulado de ICMS, que é proveniente de operações passadas onde o crédito de ICMS foi maior do que o débito, o que gerou um crédito acumulado que não pôde ser utilizado no passado, mas que poderia ser utilizado no futuro. Desta forma, também se faz necessário considerar esta parcela de crédito acumulado, representada pela constante $ICMSCA_u$, que ao ser adicionada ao saldo de ICMS descrito na expressão (13), forma a expressão descrita abaixo.

$$\sum_{ij \in UF^+(u)} \sum_{s \in S} icms(i, j, s) \cdot y_{ij}^s - \sum_{ij \in UF^-(u)} \sum_{s \in S} icms(i, j, s) \cdot y_{ij}^s - ICMSCA_u, \forall u \in U \quad (14)$$

É importante frisar que os créditos entram com valor negativo, e os débitos com valor positivo. Isso ocorre porque o saldo da UF deve entrar na função objetivo como custo. Quando o saldo de ICMS de uma determinada UF torna-se credor, ou seja, tem um saldo negativo, ele não pode ser compensando no saldo de uma outra UF, de forma que esse crédito de ICMS é perdido. Portanto, como o saldo do ICMS negativo não pode ser utilizado, limita-se o valor do saldo do ICMS em zero, caso contrário o resolvidor poderia

incluir saldos negativos na função objetivo visando minimizá-la, o que não ocorreria na aplicação real. Por esse motivo, cria-se a variável auxiliar $z_u \in \mathbb{R}^+$, que possui limite inferior em 0 e, a partir dessa variável, cria-se uma nova restrição conforme a inequação (15) e adiciona-se o somatório $\sum_{u \in U} z_u$ à função objetivo (8), obtendo a função objetivo (16).

$$z_u \geq \sum_{ij \in UF^+(u)} \sum_{s \in S} icms_{i,j}^s \cdot y_{ij}^s - \sum_{ij \in UF^-(u)} \sum_{s \in S} icms_{i,j}^s \cdot y_{ij}^s - ICMSCA_u, \forall u \in U \quad (15)$$

$$\min \sum_{(i,j) \in A} a_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{s \in S} b_{i,j}^s \cdot y_{ij}^s + \sum_{u \in U} z_u \quad (16)$$

5.2.5 Crédito Presumido de ICMS

Como descrito na subseção 3.2.3, que trata dos benefícios fiscais, o crédito presumido acrescenta um desconto de ICMS na saída da UF e retira os créditos na entrada, de forma que o saldo final entre o acréscimo do novo desconto e a retirada do desconto antigo em forma créditos na entrada seja inferior ao valor que seria pago apenas com o desconto antigo através de créditos de ICMS. Um exemplo de cálculo é descrito abaixo.

Cálculo convencional através de crédito e débito:

$$\text{débito} - \text{crédito} = [\text{saldo devedor}]$$

$$100 - 80 = 20$$

Cálculo com crédito presumido:

$$\text{débito} \cdot [1 - \% \text{ crédito presumido}] - \text{crédito} \cdot [1 - \text{ICMS}[\%] \text{anulacao}] = [\text{saldo devedor}]$$

Considerando um percentual de crédito presumido de 30% e uma anulação completa dos créditos, temos:

$$100 \cdot [1 - 0,3] - 80 \cdot [1 - 1] = 70$$

Considerando a estrutura do saldo de ICMS construída na seção 5.2.4, pode-se incluir o crédito presumido no modelo de saldo de ICMS inserindo o percentual de crédito presumido aos débitos de ICMS, e o percentual de anulação de crédito aos créditos de ICMS. Desta forma altera-se os custos da inequação (14) conforme a inequação abaixo:

$$z_u \geq \sum_{ij \in UF^+(u)} \sum_{s \in S} m_{i,j}^s \cdot y_{ij}^s - \sum_{ij \in UF^-(u)} \sum_{s \in S} n_{i,j}^s \cdot y_{ij}^s - p_u, \forall u \in U \quad (17)$$

Onde:

$$m_{i,j}^s = icms(i, j, s) - CredPres(i, j, s)$$

$$n_{i,j}^s = icms(i, j, s) \cdot (1 - ICMS[\%]anulacao_j^s)$$

$$p_u = ICMSCA_u$$

5.2.6 DIFAL

Conforme descrito na seção 3.2.6, o DIFAL é a diferença entre o ICMS interestadual e o ICMS interno do estado do destino. Desta forma, pode-se incluir o custo do difal na parcela $m_{i,j}^s$ da inequação (17):

$$m_{i,j}^s = icms(i, j, s) - CredPres_{i,j,s} + difal(i, j, s)$$

Onde:

$$difal(i, j, s) = icms(j, j, s) - icms(i, j, s) \quad (18)$$

A definição da função $icms(i, j, s)$ é dada em (12), na subseção 5.2.4.

5.2.7 ICMS-ST

O custo do ICMS-ST (Substituição Tributária do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços), apesar de ser um imposto derivado do ICMS, não faz parte do saldo do ICMS. Por este motivo, ele não é associado à restrição (17), sendo incluído diretamente na função objetivo. Assim, adiciona-se o custo do ICMS-ST à constante b_{ij}^s da função objetivo (8), e a constante passa a ser definida como $b_{ij}^s = CVL_{ij} + icmsST(i, j, s)$. Como o ICMS-ST não é cobrado em todos os casos, a função $icmsST(i, j, s)$ retorna um custo 0 caso não haja incidência de ICMS-ST no arco (i, j) para o produto s . O cálculo da função $icmsST(i, j, s)$ é dado abaixo.

$$icmsST(i, j, s) = \begin{cases} (icmsbc(i, j, s) + ipi(i, j, s)) \\ \cdot (1 + MVA_{ij}^s) \cdot ICMSSTalqt_{ij}^s & , \text{ se há ICMS-ST} \\ -icms(i, j, s) \\ \\ 0 & , \text{ se não há ICMS-ST} \end{cases} \quad (19)$$

$$icmsbc(i, j, s) = \frac{VP_{ij}^s}{(1 - ICMSalqt_{ij}^s - PISalqt^s - COFINSalqt^s)} \quad (20)$$

$$ipi(i, j, s) = icmsbc(i, j, s) \cdot IPIalqt^s \quad (21)$$

A função para o cálculo do ICMS-ST (19) é composta pela base de cálculo do ICMS (20), o custo do IPI (21), o MVA_{ij}^s que é o percentual de Margem de Valor Agregado aplicado sobre o produto s para o arco (i, j) , $ICMSalqt_{ij}^s$ que é a alíquota do ICMS no arco (i, j) para o produto s , e o $icms(i, j, s)$ que é o custo calculado do ICMS definido na função (12).

A base de cálculo do ICMS é definida na função (20) e é usada para o cálculo do ICMS, do ICMS-ST e do IPI. Ela é composta pelo VP_{ij}^s (Valor do Produto), a alíquota de ICMS, a alíquota do PIS, e a alíquota do CONFINS.

A equação (21) é o custo do IPI, que é calculado multiplicando-se a base de cálculo do ICMS com a alíquota do IPI.

5.2.8 Custos de aquisição de produtos

Os custos de aquisição podem variar de acordo com o fornecedor escolhido e com a rota em que o produto transita, uma vez que a rota influencia nos impostos a serem cobrados. Portanto, se faz necessária a inclusão dos custos de produto de acordo com a origem i e do ICMS cobrado na movimentação no arco (i, j) .

Para auxiliar nos cálculos de aquisição de produto, define-se as rotas onde há aquisição de produto como $AF = \{(i, j) \in A \mid (i, j) \text{ é uma rota de aquisição}\}$. O valor

da produto s sem imposto, que passa pela arco (i, j) é definido como VP_{ij}^s , e o ICMS cobrado na rota é definido através da função $icms(i, j, s)$, que é definida em (12).

Posto isso, define-se a função $custoAquisicao(i, j, s)$ como:

$$custoAquisicao(i, j, s) = \begin{cases} VP_{i,j}^s + icms(i, j, s) & , \text{ se } (i, j) \in AF \\ 0 & , \text{ se } (i, j) \notin AF \end{cases} \quad (22)$$

5.2.9 Eliminação de circuitos

Conforme abordado na seção 3.2.7, a mecânica de créditos e débitos pode gerar circuitos no modelo quando uma determinada condição existe. Entretanto esses circuitos não são logisticamente viáveis, uma vez que tal operação é considerada ilegal. Deve-se assim eliminar esses circuitos do modelo. Esta seção aborda a construção de uma restrição de plano de corte — conforme conceitos apresentados na seção 2.2.1 — que elimina a possibilidade de existência de circuitos.

Dados:

$N = \{1, \dots, q \mid N \subset \mathbb{Z}, \text{ sendo } q \text{ a quantidade de circuitos possíveis no grafo}\}$: conjunto que enumera todos os circuitos possíveis no grafo.

$C(n) = \{(i, j) \mid (i, j) \in A, n \in N\}$: conjunto que contém os arcos (i, j) pertencentes ao circuito n .

$|C(n)|$: Cardinalidade do conjunto $C(n)$. Indica a quantidade de arcos (i, j) pertencentes ao conjunto $C(n)$.

A forma adotada para encontrar os circuitos $C(n), \forall n \in N$ é através do algoritmo de detecção de ciclos de Jonhson (2015), que enumera todos os ciclos possíveis a partir de um dado grafo, tendo o tempo limitado em $O((V + A)(C + 1))$, onde V é o conjunto de vértices, A o conjunto dos arcos e C o conjunto dos ciclos. O algoritmo de Jonhson (2015), em uma de suas etapas, necessita de um algoritmo complementar para encontrar os componentes fortemente ligados. Neste trabalho, o algoritmo utilizado foi o algoritmo de Kosaraju, que possui tempo linear $\Theta(V + A)$, conforme descrito por Cormen *et al.* (2009). Além do algoritmo de Kosaraju, outros algoritmos poderiam ser utilizados para encontrar os componentes fortemente ligados, como os algoritmos de Gabow (2000) e Tarjan (1972).

Com os circuitos encontrados, são adicionadas as restrições dadas pelas inequações (23) e (24), e a função objetivo que era dada pela expressão linear (16) passa a ser representada pela expressão linear (35). Onde w_{ij}^s é uma variável binária, para todo arco $(i, j) \in A$ e todo produto $s \in S$, que assume valor 1 quando o fluxo y_{ij}^s for maior ou igual a 0, e valor 0 quando o fluxo y_{ij}^s for 0.

$$\sum_{(ij) \in C(n)} \sum_{(s) \in S} w_{ij}^s \leq |C(n)| - 1, \forall n \in N \quad (23)$$

$$w_{ij}^s \cdot M \geq y_{ij}^s, \forall (i, j) \in A, s \in S \quad (24)$$

$$\min \sum_{(i,j) \in A} a_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{s \in S} b_{i,j}^s \cdot y_{ij}^s + \sum_{u \in U} z_u + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{s \in S} w_{ij}^s \quad (25)$$

Como a restrição (23) itera sobre todos os circuitos possíveis, a quantidade de restrições pode chegar, a depender da instância, a até 1.443^4 restrições, Sendo A o conjunto de todos os arcos do grafo G , conforme definido por Arman e Tsaturian (2017).

Com o objetivo de diminuir a quantidade de restrições formadas pela inequação (23) e assim tornar o modelo mais eficaz, será adotado um modelo de criação de restrições via *callback*, onde a restrição (23) será adicionada ao modelo conforme os ciclos n aparecem nas soluções parciais do resolvidor, ou seja, a cada solução viável encontrada.

Em vista disso, será implementado o algoritmo 3, definido a seguir, através de uma *callback* do tipo *lazy constraint*, que será responsável por adicionar novas restrições conforme a inequação (23), à medida que o solver encontra novas soluções viáveis. Mais informações sobre o funcionamento da *lazy constraint* podem ser encontradas na documentação do resolvidor utilizado, o *IBM Cplex*, na página do fabricante IBM (2022a).

Algoritmo 3 Plano de corte para eliminação de circuitos

```

1: Ler variáveis  $w_{ij}$  da solução atual
2: Filtrar apenas as variáveis  $w_{ij} = 1$  e adicionar ao vetor  $SG$ 
3: procedure DETECTARCICLOS( $SG$ )
4:   Aplicar algoritmo de Johnson para detecção de ciclos
5:   return quantidade de ciclos encontrados
6: procedure C( $n$ )
7:   return vetor composto pelos arcos  $(i, j)$  que compõe o ciclo  $n$ 
8: procedure ADRESTRICAO( $r$ )
9:   adiciona uma nova restrição  $r$  do tipo lazy constraint ao modelo
10:  $CP \leftarrow$  DETECTARCICLOS( $SG$ )
11:  $n \leftarrow 0$ 
12: while  $n < CP$  do
13:   ADRESTRICAO( $\sum_{(ij) \in C(n)} w_{ij} \leq |C(n)| - 1$ )
14:    $n++$ 

```

 Fonte: Estível Ramos Jr.

5.3 Construção dos modelos de programação inteira propostos para o problema de Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos com Tributação.

Nesta seção serão propostos dois modelos de programação inteira para o problema de Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos com Tributação. A seção 5.3.1 define os conjuntos utilizados pelo modelo, a seção 5.3.2 define os dados e cálculos que serão usados e consolida os custos em um número menor de constantes, e a seção 5.4.1 define o modelo proposto para os casos onde não há incidência de circuitos, e a seção 5.4.2 define o modelo proposto para os casos onde podem ocorrer circuitos.

5.3.1 Definição de conjuntos

Dados para construção do modelo

$G = (V, A)$: Grafo orientado que define a rede.

$V = \{v \mid v \text{ é um vértice do grafo orientado } G\}$

$A = \{(i, j) \mid (i, j) \text{ é um arco que parte de } i \text{ em direção a } j, i \in V, j \in V\}$

$S = \{s \mid s \text{ é um produto que circula dentro da rede logística}\}$

$N^+(j) = \{i \mid (i, j) \in A, i \in V, j \in V\}$

$N^-(j) = \{i \mid (j, i) \in A, j \in V, i \in V\}$

$U = \{u \mid u \text{ é uma UF do Brasil.}\}$

$UF(u) = \{ i \mid i \text{ é um vértice que está dentro da UF } u, i \in V \}$

$UF^+(u) = \{ (i, j) \in A \mid i \in UF(u), j \in V, i \notin O(s) \forall s \in S \}$.

$UF^-(u) = \{ (i, j) \in A \mid i \in V, j \in UF(u), j \notin D(s) \forall s \in S \}$.

$O(s) = \{ i \mid i \text{ é um vértice de origem e fornece o produto } s, i \in V \}$

$D(s) = \{ i \mid i \text{ é um vértice de destino e consome o produto } s, i \in V \}$

$N = \{ 1, \dots, q \mid N \subset \mathbb{Z}, q \text{ é a quantidade de circuitos no grafo} \}$

$C(n) = \{ (i, j) \mid (i, j) \in A, n \in N \}$: Contém os arcos que compõe o circuito n .

o_i^s : quantidade do produto s fornecida pelo vértice de origem i .

d_i^s : quantidade do produto s consumida pelo vértice de destino i .

5.3.2 Dados e cálculos de entrada

Nesta seção são apresentados os dados de entrada e seus respectivos cálculos. Valores diretos são dados como constantes com índices subscritos e sobrescritos, enquanto que os cálculos são demonstrados em função dos índices.

Dados de Custos Logísticos

CVL_{ij} : Custo Variável Logístico em relação ao fluxo do arco (i, j) . Este custo pode ser de dois tipos: quando o arco representa uma rota, o custo relacionado ao arco é custo de frete; quando o arco representa uma instalação, o custo relacionado ao arco é o custo variável para o funcionamento da instalação.

CFL_{ij} : Custo Fixo Logístico associado ao arco (i, j) , se e somente se o arco possuir um fluxo positivo. O custo fixo é sempre relacionado ao funcionamento de uma instalação.

C_{ij} : Capacidade de fluxo do arco (i, j) . A capacidade do arco não está relacionada à capacidade de transportes, mas sim à capacidade de expedição de uma instalação, e está diretamente relacionado ao custo fixo e ao porte da instalação.

Dados e Cálculos de Custos de ICMS

VP_{ij}^s : valor declarado do produto s saindo do vértice i em direção ao vértice j .

$ICMSalqt_{ij}^s$: Alíquota de ICMS aplicada na circulação do produto s saindo do vértice i em direção ao vértice j .

$ICMSalqtCredPres_{ij}^s$: Percentual de crédito presumido para o produto s saindo do vértice i em direção ao vértice j .

$PISalqt^s$: Alíquota de PIS para o produto s .

$COFINSalqt^s$: Alíquota de COFINS para o produto s .

$ICMS[\%]anulacao_j^s$: Percentual de anulação de crédito de ICMS para os produtos s que chegam ao vértice j .

$$icms(i, j, s) = \frac{VP_{ij}^s}{(1-ICMSalqt_{ij}^s - PISalqt^s - COFINSalqt^s)} \cdot ICMSalqt_{ij}^s$$

$$CredPres(i, j, s) = \frac{VP_{ij}^s}{(1-ICMSalqt_{ij}^s - PISalqt^s - COFINSalqt^s)} \cdot ICMSalqtCredPres_{ij}^s$$

$$difal(i, j, s) = icms(j, j, s) - icms(i, j, s)$$

$ICMSCA_u$ = Valor de crédito acumulado de ICMS na UF u , que pode ser utilizado na UF u . Esse valor é referente ao acumulado de crédito de ICMS da operação em períodos anteriores ao período do cenário base.

Dados e Cálculos de Custos de ICMS-ST

MVA_{ijs} : percentual de Margem de Valor Agregado aplicado sobre o produto s com origem i e destino j .

$IPIalqt^s$: Alíquota de IPI do produto s .

$$ipi(i, j, s) = \frac{VP_{ij}^s}{(1-ICMSalqt_{ij}^s - PISalqt^s - COFINSalqt^s)} \cdot IPIalqt^s$$

$$icmsbc(i, j, s) = \frac{VP_{ij}^s}{(1-ICMSalqt_{ij}^s - PISalqt^s - COFINSalqt^s)}$$

$$icmsST(i, j, s) = \begin{cases} (icmsbc(i, j, s) + ipi(i, j, s)) \\ \cdot (1 + MVA_{ijs}^s) \cdot ICMSalqt_{ij}^s & , \text{ se há ICMS-ST} \\ -icms(i, j, s) \\ 0 & , \text{ se não há ICMS-ST} \end{cases} \quad (26)$$

Dados e Cálculos de Custos de Aquisição

$AF = \{ (i, j) \mid (i, j) \in A, (i, j) \text{ é um arco de aquisição} \}$.

$VP_{i,j}^s$: valor do produto s na movimentação realizada no arco (i, j) .

$icms(i, j, s)$: função definida na fórmula (12).

$$custoAquisicao(i, j, s) = \begin{cases} VP_{i,j}^s + icms(i, j, s) & , \text{ se } (i, j) \in AF \\ 0 & , \text{ se } (i, j) \notin AF \end{cases} \quad (27)$$

Custos Consolidados para F.O.

$$a_{i,j} = CFL_{ij}$$

$$b_{i,j}^s = CVL_{ij} + icmsST(i, j, s) + custosFornecimento(i, j, s)$$

$$c_{i,j} = c_{ij}$$

$$m_{i,j}^s = icms(i, j, s) - CredPres(i, j, s) + difal(i, j, s)$$

$$n_{i,j}^s = icms(i, j, s) \cdot (1 - ICMS[\%]anulacao_j^s)$$

$$p_u = ICMSCA_u$$

5.4 Modelos propostos

Esta seção descreve de maneira sucinta os modelos desenvolvidos na seção 5.3.

5.4.1 Modelo de programação inteira sem restrição de circuitos

x_{ij} : variável binária que define se o arco (i, j) foi utilizado pela rede, assumindo valor 1 quando o arco for utilizado, e 0 quando não for.

y_{ij}^s : fluxo do produto s que parte do vértice i em direção ao vértice j

z_u : variável auxiliar para minimizar o saldo de ICMS para cada UF $u \in U$.

Função objetivo:

$$\min \sum_{(i,j) \in A} a_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{s \in S} b_{i,j}^s \cdot y_{ij}^s + \sum_{u \in U} z_u \quad (28)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in N^+(j)} y_{ij}^s - \sum_{i \in N^-(j)} y_{ji}^s = \begin{cases} -o_j^s & , \text{ se } j \in O(s) \\ d_j^s & , \text{ se } j \in D(s) \\ 0 & , \text{ para os demais casos} \end{cases} \quad , \forall j \in V, s \in S \quad (29)$$

$$\sum_{s \in S} y_{ij}^s \leq c_{ij} \cdot x_{ij} \quad , \forall (i, j) \in A \quad (30)$$

$$z_u \geq \sum_{ij \in UF^+(u)} \sum_{s \in S} m_{i,j}^s \cdot y_{ij}^s - \sum_{ij \in UF^-(u)} \sum_{s \in S} n_{i,j}^s \cdot y_{ij}^s - p_u \quad , \forall u \in U \quad (31)$$

$$x_{ij}^s \in \{0, 1\} \quad (32)$$

$$y_{ij}^s \in \mathbb{R} \quad , y_{ij}^s > 0 \quad (33)$$

$$z_u \in \mathbb{R} \quad , z_u > 0 \quad (34)$$

A inequação (29) garante que o balanço de massa entre os fluxos seja respeitado em cada vértice e para todos os produtos que passam por aquele vértice. A inequação (30) garante que os fluxos respeitem as capacidades dos arcos, e proíbe que exista fluxo em algum arco não atribuído pelo desenho da rede.

A inequação (31) calcula o saldo devido de ICMS para cada UF e , como $z_u \in \mathbb{R}^+$, o saldo de ICMS será sempre positivo e portanto um custo na função objetivo.

5.4.2 Modelo de Programação Inteira com restrição de circuitos

Variáveis

x_{ij} : variável binária que define se o arco (i, j) foi utilizado pela rede, assumindo valor 1 quando o arco for utilizado, e 0 quando não for.

w_{ij}^s : variável binária que define se o produto s foi utilizado pela rede no arco (i, j) , assumindo valor 1 quando for utilizado, e 0 quando não for.

y_{ij}^s : fluxo do produto s que parte do vértice i em direção ao vértice j

z_u : variável auxiliar para minimizar o saldo de ICMS para cada UF $u \in U$.

Função objetivo:

$$\min \sum_{(i,j) \in A} a_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{s \in S} b_{i,j}^s \cdot y_{ij}^s + \sum_{u \in U} z_u + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{s \in S} w_{ij}^s \quad (35)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in N^+(j)} y_{ij}^s - \sum_{i \in N^-(j)} y_{ji}^s = \begin{cases} -o_j^s & , \text{ se } j \in O(s) \\ d_j^s & , \text{ se } j \in D(s) \\ 0 & , \text{ para os demais casos} \end{cases} \quad , \forall j \in V, s \in S \quad (36)$$

$$\sum_{s \in S} y_{ij}^s \leq c_{ij} \cdot x_{ij} \quad , \forall (i, j) \in A \quad (37)$$

$$z_u \geq \sum_{ij \in UF^+(u)} \sum_{s \in S} m_{i,j}^s \cdot y_{ij}^s - \sum_{ij \in UF^-(u)} \sum_{s \in S} n_{i,j}^s \cdot y_{ij}^s - p_u \quad , \forall u \in U \quad (38)$$

$$\sum_{(ij) \in C(n)} w_{ij}^s \leq |C(n)| - 1 \quad , \forall n \in N \quad (39)$$

$$w_{ij}^s \cdot M \geq y_{ij}^s \quad , \forall (i, j) \in A, s \in S \quad (40)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (41)$$

$$w_{ij}^s \in \{0, 1\} \quad (42)$$

$$y_{ij}^s \in \mathbb{R} \quad , y_{ij}^s > 0 \quad (43)$$

$$z_u \in \mathbb{R} \quad , z_u > 0 \quad (44)$$

Retomando a subseção 5.4.1, a inequação (29) garante o balanço de massa nos vértices, a inequação (30) garante que os fluxos respeitem as capacidades dos arcos e a inequação (31) calcula o saldo devido de ICMS para cada UF.

Entretanto, para este modelo que contém a restrição de circuitos, troca-se a expressão linear (28) da função objetivo do modelo anterior pela expressão linear (35), que inclui o termo com a soma das variáveis binárias w_{ij}^s . Também são incluídas as restrições (39), (40) e a restrição do domínio da variável w_{ij}^s , dada pela definição (42).

Conforme a subseção 3.2.7, que trata do problema dos circuitos tributários, as inequações (39) e (40) não são introduzida no modelo inicial passado para o resolvidor, porque são restrições do tipo *lazy constraint callback*, sendo adicionadas a cada nova solução encontrada.

Na restrição (39), CP é o conjunto que contém os índices n dos ciclos possíveis e $C(n)$ é o conjunto que contém todos os arcos (i, j) que compõe o ciclo n , sendo esta adicionada ao modelo após o resolvidor encontrar uma solução inteira melhor do que a anterior. A cada solução encontrada, o resolvidor retorna o valor das variáveis y_{ij}^s da solução, que passam então pelo algoritmo de detecção de ciclos (3) e, caso sejam encontrados circuitos no grafo da solução (note que neste caso não se trata do grafo completo, mas sim de um subgrafo formado a partir dos arcos com volume alocado pela solução atual), uma restrição é adicionada conforme cada ciclo $n \in N$.

Analogamente, a restrição (40) que tem por objetivo identificar os arcos em uso, também é adicionada conforme novas soluções são encontradas, juntamente com a restrição (39).

6 Coleta de dados e geração de instâncias

Neste capítulo será abordado o tratamento e a criação das bases de dados que serão utilizadas como cenários para otimização. Esses cenários serão divididos em dois grupos principais, o primeiro grupo será construído a partir de uma base de dados reais, extraídas de uma indústria farmacológica, e o segundo será construído a partir de bases criadas artificialmente de forma randômica, a partir de parâmetros iniciais pré-definidos. O primeiro grupo de cenários será detalhado na seção 6.2, e o segundo na seção 6.3.

Ao final do capítulo, serão definidas as bases de dados conforme a tabela 7.

Tabela 7 – Lista geral de bases

Grupo	Instância	ID instância
farmacológico	sem benefício fiscal	F-SBF
farmacológico	com benefício fiscal	F-CBF
artificial	10_10_10_100_25	A-BASE
artificial	10_10_20_100_25	A-CD-01
artificial	10_10_40_100_25	A-CD-02
artificial	10_10_80_100_25	A-CD-03
artificial	10_10_160_100_25	A-CD-04
artificial	10_10_10_200_25	A-CLI-01
artificial	10_10_10_400_25	A-CLI-02
artificial	10_10_10_800_25	A-CLI-03
artificial	10_10_10_1600_25	A-CLI-04
artificial	10_10_10_100_50	A-PROD-01
artificial	10_10_10_100_100	A-PROD-02
artificial	10_10_10_100_200	A-PROD-03
artificial	10_10_10_100_400	A-PROD-04

Fonte: Estível Ramos Jr.

6.1 Organização dos dados

Para todas os cenários, os dados de entrada para o modelo foram organizados em 3 modelos de tabela:

- Arcos e dados associados
- Vértices e dados associados
- Demandas e fornecimento

A tabela de arcos é dada conforme o modelo da tabela 8, que contém os principais dados usados pelos modelos, onde o tipo de arco indica se o arco é uma localidade ou uma

rota de transporte, conforme visto na seção 5.2.2. A coluna i indica o vértice de origem, j indica o vértice de destino e s indica o produto. As definições de custo são dadas por a para custos fixos, b para custos variáveis, m e n para débitos e créditos tributários e por fim c define as capacidades. A composição de cada custo pode ser revisitada na seção 5.3.2.

Tabela 8 – Formatação de dados para arcos

tipo de arco	i	j	s	a	b	c	m	n
transporte	A-out	Ain	S	0	0	100	0	12
transporte	Bout	A-out	S	0	0	100	0	7
localidade	Ain	Aout	S	0	0	100	0	0
transporte	Aout	Bin	S	0	0	100	10	10
transporte	Bout	Ain	S	0	0	100	7	7
location	Bin	Bout	S	0	0	100	0	0
transporte	Bout	B+in	S	0	0	100	17	0

Fonte: Estível Ramos Jr.

A tabela de vértices é usada para associar cada vértice a uma UF específica. Essa definição é necessária nas restrições (31) e (38) dos modelos, conforme definido na seção (5.2.4).

Tabela 9 – Formatação de dados para vértice

Vértice	UF	Tipo
A-out	MG	origem
Ain	RJ	passagem
Aout	RJ	passagem
Bin	SP	passagem
Bout	SP	passagem
B+in	RS	demanda

Fonte: Estível Ramos Jr.

A tabela de demandas e fornecimento associa uma demanda d e um fornecedor o de um determinado produto s a um vértice i , conforme requerido pelas restrições (29) e (36).

Tabela 10 – Formatação de dados para demandas e fornecimento

Vértice	S	UF	Tipo	d	o
A-out	s	MG	origem	0	10
B+in	s	RS	demanda	10	0

Fonte: Estível Ramos Jr.

6.2 Instâncias com dados do setor farmacológico

Foram tratadas duas bases a partir dos dados recebidos. O objetivo é verificar o impacto de um benefício fiscal através de crédito presumido no desenho de rede de uma cadeia de suprimentos, portanto as duas instâncias têm custos e capacidades iguais, com exceção da tributação de ICMS realizada em PE, que na segunda instância possui um crédito presumido de 85%.

6.2.1 Descrição da base coletada

A base de dados coletada contém um centro de distribuição e uma fábrica, ambos localizados em SP. Os valores de custo fixo logístico e capacidades seguem conforme a tabela 11. Como tanto a fábrica como o centro de distribuição são as únicas localidades de seus tipos, conclui-se que são suficientes para atender toda a demanda, de forma que para fins de parametrização no modelo, adota-se capacidade = demanda total.

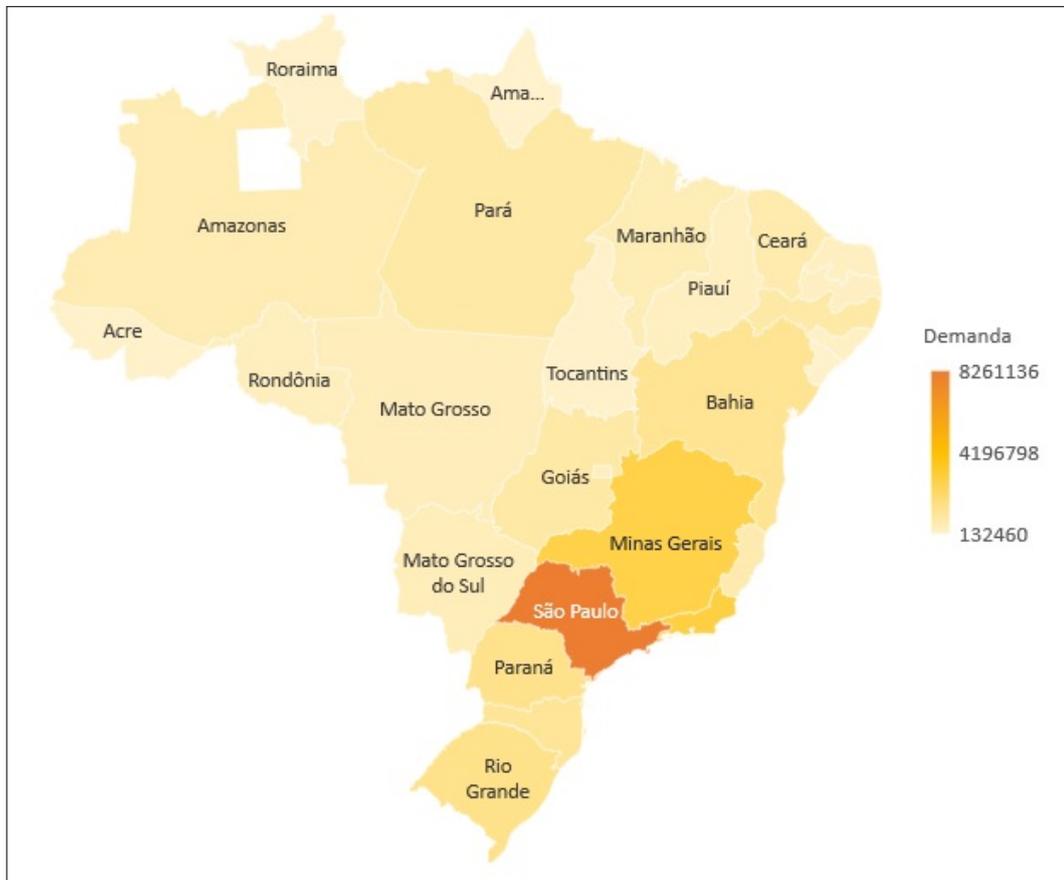
Tabela 11 – Base farmacológica: custos fixos e capacidades

Localidade	Custo fixo (R\$)	Capacidade (unidades)
Fábrica	3464620	28420408 (demanda total)
Centro de Distribuição	2713488	28420408 (demanda total)

Fonte: Estível Ramos Jr.

O sortimento é de 293 produtos, com demanda total de 28.420.408 unidades. Através do mapa de calor da figura 15 e da tabela 12, pode-se observar a demanda de cada UF.

Figura 15 – Demanda por UF.



Fonte: Estível Ramos Jr

Tabela 12 – Demandas por UF

UF	Demanda
AC	190.036
AL	276.488
AM	648.616
AP	132.460
BA	1.273.912
CE	728.120
DF	377.768
ES	703.876
GO	884.752
MA	569.148
MG	2.723.132
MS	496.892
MT	457.740
PA	889.460
PB	332.804
PE	897.060
PI	349.372
PR	1.430.132
RJ	2.897.884
RN	342.704
RO	397.676
RR	156.100
RS	1.448.668
SC	1.177.256
SE	192.312
SP	8.261.136
TO	184.904

Fonte: Estível Ramos Jr

6.2.2 Instância farmacológica: sem benefício fiscal

A base ajustada servirá como insumo para a base de dados sem benefício fiscal definida nesta seção, e uma base de dados com benefício fiscal, definida na seção 6.2.3.

A partir dos dados coletados, foram ampliadas as quantidades de centros de distribuição e fábricas para que haja uma opção de abertura de localidade de cada tipo em cada UF, criando assim localidades candidatas a serem escolhidas na otimização.

Em seguida foram definidos os custos de fretes, utilizando como referência as tabelas de custos de frete da Agência Nacional de Transporte Terrestre (ANTT), através de consulta realizada no site da ANTT (2022), para um veículo de Carga Geral de 6 eixos. Desta forma, foi obtida a composição de frete conforme a tabela 13.

Tabela 13 – Composição para os valores de frete

Custo	Valor	unidade
Deslocamento (CCD)	5,40	R\$/km
Carga e descarga (CCC)	340,76	R\$/viagem

Fonte: Estível Ramos Jr

A partir da tabela 13 foi calculado o CV (custo viagem) entre as capitais de cada estado, considerando a distância rodoviária em km entre as UF do Brasil, através da fórmula (45), onde D é a distância da rota (km), CD é o custo do deslocamento (R\$/km) e CCC é o custo de carga e descarga (R\$)

Para as distâncias das rotas, foi considerado o percurso rodoviário entre as capitais de cada UF, conforme os quadros 9, 10 e 11, disponíveis no apêndice A. O km adotado para viagens que possuem a mesma UF como origem e destino foi de 300 km.

$$CV = D \cdot CD + CCC \quad (45)$$

Após o cálculo realizado através da fórmula (45), obtém-se os quadros 12, 13 e 14, disponíveis no apêndice A, que contém a matriz de fretes que foi utilizada para compor as bases.

Definidos os custos logísticos, define-se os custos tributários. Para esta instância que é construída sem o uso de benefício fiscal, toma-se os valores de alíquotas padrão, tanto para os impostos federais (IPI, PIS, COFINS) quanto para os impostos estaduais (ICMS). O quadro 15 contém as alíquotas federais, enquanto que os quadros 16 e 17 contém as alíquotas de ICMS. Os quadros 15, 16 e 17 estão disponíveis no apêndice B.

Como o primeiro grupo de instâncias foca no benefício fiscal disponibilizado pelo estado de Pernambuco, os quadros 5 e 6 exemplificam como é construída a base de dados para os parâmetros m e n , responsáveis pelos custos de ICMS.

Quadro 5 – Exemplo de parametrização tributária para os parâmetros m e n sem crédito presumido (1 de 2).

UF org	UF dest	Valor prod (R\$)	PIS (%)	COFINS (%)	ICMS (%)	BC (R\$)
SP	PE	100	1,65	7,60	7,00	98,96
PE	SP	100	1,65	7,60	12,00	94,30

Fonte: Estível Ramos Jr

Quadro 6 – Exemplo de parametrização tributária para os parâmetros m e n sem crédito presumido (R\$) (2 de 2).

UF org	UF dest	Déb org	Créd dest	Pres org	m (org)	n (dest)
SP	PE	7,00	7,00	0,00	7,00	7,00
PE	SP	12,00	12,00	0,00	12,00	12,00

Fonte: Estível Ramos Jr

Através dos conceitos apresentados na seção 3.2 e da construção do modelo para otimização do saldo de ICMS realizada na seção 5.2.4, retoma-se que a coluna BC (base de cálculo do ICMS) do quadro 5 é dada por $BC = [\text{Valor do produto}] / (1 - \text{PIS}(\%) + \text{COFINS}(\%) + \text{ICMS}(\%))$, que para a chave SP-PE presente no quadro 5 é calculada como $BC = 100 / (1 - 0,0165 + 0,0760 + 0,0700) = 98,96$.

Definida a base de cálculo do ICMS, calcula-se os valores de crédito e débito descritos no quadro 6. O cálculo do Débito na origem e Crédito no destino são calculados através da fórmula $BC \times ICMS(\%)$. A coluna Pres org indica o valor do crédito presumido na origem que, no caso desta instância, é 0. Os parâmetros m e n são dados conforme as fórmulas $m = [\text{Débito org}] + [\text{Pres org}]$ e $n = [\text{Créd dest}]$.

Os parâmetros m e n são utilizados para construir a restrição (17). Com os impostos calculados no quadro 5, pode-se exemplificar a conta do saldo de ICMS presente na restrição (17) e definida na seção 5.2.5, para tanto, toma-se como referência o estado de PE e faz-se o cálculo do saldo de ICMS através da fórmula (46), que resulta no cálculo (47).

$$[\text{Saldo PE}] = m - n \quad (46)$$

$$[\text{Saldo PE}] = 12 - 7 = 5 \quad (47)$$

Note que para o parâmetro m , apenas os valores onde PE é origem são considerados, e para n apenas os valores onde PE é destino são considerados.

6.2.3 Instância farmacológica: com benefício fiscal

A segunda instância do primeiro grupo é uma instância baseada na primeira, com o diferencial de possuir um benefício fiscal pelo estado de Pernambuco, através do PRODEPE (Programa de Desenvolvimento do Estado de Pernambuco). Através do PRODEPE, a indústria farmacológica obtém um crédito presumido de 85% na apuração de ICMS para fábricas ou armazéns localizados no estado de Pernambuco, conforme o Decreto nº 21.959 de 1999, publicado no Diário Oficial do Estado de 28 de dezembro de 1999 (DOE, 1999).

Como este primeiro grupo de instâncias foca no benefício fiscal disponibilizado pelo estado de Pernambuco, os quadros 7 e 8 exemplificam como é construída a base de dados para os parâmetros m e n , responsáveis pelos custos de ICMS, porém diferente da seção anterior (6.2.2) que não possui benefício fiscal, este exemplo possui um crédito presumido.

Quadro 7 – Exemplo de parametrização tributária para os parâmetros m e n com crédito presumido (1 de 2)

UF org	UF dest	Valor prod (R\$)	PIS (%)	COFINS (%)	ICMS (%)	BC
SP	PE	100	1,65	7,60	7,00	98,96
PE	SP	100	1,65	7,60	12,00	94,30

Fonte: Estível Ramos Jr

Quadro 8 – Exemplo de parametrização tributária para os parâmetros m e n com crédito presumido. Valores em R\$ (2 de 2)

UF org	UF dest	Déb org	Créd dest	Pres org	m (org)	n (dest)
SP	PE	7,00	0,00	00,00	7,00	0,00
PE	SP	12,00	12,00	10,20	1,80	10,00

Fonte: Estível Ramos Jr

A construção da base de cálculo presente no quadro 7 continua da mesma forma que no quadro 5, mostrado anteriormente na seção 6.2.2. Porém no quadro 8, tem-se a coluna *Pres org* (crédito presumido na origem) com o valor de 10,20 para a origem no estado de Pernambuco, esse valor é calculado com base nos 85% oferecidos pelo PRODEPE (DOE, 1999). Desta forma, tem-se o seguinte cálculo:

$$[\text{Pres org}] = [\text{Déb org}] \times 0,85$$

$$[\text{Pres org}] = 12 \times 0,85$$

$$[\text{Pres org}] = 10,20$$

Como existe um crédito presumido, não se pode utilizar o crédito anterior, de forma que o *Créd dest* passa a ser 0 para as rotas que possuem destino em PE, como exemplifica o quadro 8.

Com os novos custos de impostos calculados no quadro 7, pode-se exemplificar a conta do saldo de ICMS definida na seção (17) com o benefício fiscal incluso, para tanto, toma-se como referência o estado de PE e faz-se o cálculo do saldo de ICMS através da fórmula (48), que resulta no cálculo (49).

$$[\text{Saldo PE}] = m - n \quad (48)$$

$$[\text{Saldo PE}] = 1,80 - 0 = 1,80 \quad (49)$$

Note que novamente, assim como primeira instância 6.2.2, apenas os valores onde PE é origem são considerados para o parâmetro m , e apenas os valores onde PE é destino são considerados para n .

Através dos exemplos das expressões (47) e (49), podemos ver o afeito de desconto que o benefício fiscal gera na apuração de ICMS em PE.

6.3 Instâncias geradas artificialmente

Com o objetivo de testar a performance do modelo, e entender como este se comporta em relação ao tamanho e configuração do grafo de entrada que define as possibilidades do projeto de rede, foram geradas 13 instâncias de forma artificial, tendo elas a mesma quantidade de níveis: fornecedores, fábricas, centros de distribuição e clientes.

O cenário inicial contém 10 localidades para fornecedores, 10 para as fábricas, 10 para os centros de distribuição, 100 para os clientes e um sortimento de 25 produtos. Os demais cenários variam os níveis de centros de distribuição, cliente e a quantidade de produtos, com um fator de 2x em relação ao cenário anterior. A configuração dos cenários gerados pode ser verificada na tabela 14.

Tabela 14 – Características das instâncias artificiais

ID instância	qnt fornecedores	qnt fábricas	qnt CDs	qnt clientes	qnt prod
A-BASE-01	10	10	10	100	25
A-CD-01	10	10	20	100	25
A-CD-02	10	10	40	100	25
A-CD-03	10	10	80	100	25
A-CD-04	10	10	160	100	25
A-CLI-01	10	10	10	200	25
A-CLI-02	10	10	10	400	25
A-CLI-03	10	10	10	800	25
A-CLI-04	10	10	10	1600	25
A-PROD-01	10	10	10	100	50
A-PROD-02	10	10	10	100	100
A-PROD-03	10	10	10	100	200
A-PROD-04	10	10	10	100	400

Fonte: Estível Ramos Jr

7 Experimentos computacionais

Neste capítulo, serão apresentados os experimentos e os resultados encontrados. A seção 7.1 expõe as características dos experimentos, e as seções 7.2 e 7.3.4 contemplam a análise dos resultados dos experimentos realizados com a instância farmacológica e as instâncias artificiais, respectivamente.

Os experimentos foram realizados conforme os cenários citados na tabela 15, que consiste na abertura da tabela 7 para os dois modelos propostos no capítulo 5.

Tabela 15 – Lista de cenários

Grupo	ID Instância	Modelo	ID cenário
farmacológica	F-SBF	SEMRC	F-SBF-SRC
farmacológica	F-SBF	COMRC	F-SBF-CRC
farmacológica	F-CBF	SEMRC	F-CBF-SRC
farmacológica	F-CBF	COMRC	F-CBF-CRC
artificial	A-BASE	COMRC	CA-BASE-01-CRC
artificial	A-BASE	SEMRC	CA-BASE-01-SRC
artificial	A-CD-01	COMRC	CA-CD-01-CRC
artificial	A-CD-01	SEMRC	CA-CD-01-SRC
artificial	A-CD-02	COMRC	CA-CD-02-CRC
artificial	A-CD-02	SEMRC	CA-CD-02-SRC
artificial	A-CD-03	COMRC	CA-CD-03-CRC
artificial	A-CD-03	SEMRC	CA-CD-03-SRC
artificial	A-CD-04	COMRC	CA-CD-04-CRC
artificial	A-CD-04	SEMRC	CA-CD-04-SRC
artificial	A-CLI-01	COMRC	CA-CLI-01-CRC
artificial	A-CLI-01	SEMRC	CA-CLI-01-SRC
artificial	A-CLI-02	COMRC	CA-CLI-02-CRC
artificial	A-CLI-02	SEMRC	CA-CLI-02-SRC
artificial	A-CLI-03	COMRC	CA-CLI-03-CRC
artificial	A-CLI-03	SEMRC	CA-CLI-03-SRC
artificial	A-CLI-04	COMRC	CA-CLI-04-CRC
artificial	A-CLI-04	SEMRC	CA-CLI-04-SRC
artificial	A-PROD-01	COMRC	CA-PROD-01-CRC
artificial	A-PROD-01	SEMRC	CA-PROD-01-SRC
artificial	A-PROD-02	COMRC	CA-PROD-02-CRC
artificial	A-PROD-02	SEMRC	CA-PROD-02-SRC
artificial	A-PROD-03	COMRC	CA-PROD-03-CRC
artificial	A-PROD-03	SEMRC	CA-PROD-03-SRC
artificial	A-PROD-04	COMRC	CA-PROD-04-CRC
artificial	A-PROD-04	SEMRC	CA-PROD-04-SRC

Fonte: Estível Ramos Jr

7.1 Metodologia

O primeiro grupo de experimentos, que será analisado na seção 7.2, trata de uma análise de 4 cenários relacionados as instâncias farmacológicas: F-SBF-SRC, F-SBF-CRC, F-CBF-SRC, F-CBF-CRC, conforme apresentado na tabela 15. Seu objetivo é analisar o ganho potencial de um determinado benefício fiscal, e compreender o equilíbrio entre os custos (*trade-off*) logísticos e tributários, uma vez que apesar do benefício fiscal proporcionar economia, a mudança realizada nos fluxos logísticos trazem um custo adicional a rede.

O segundo grupo de experimentos trata da análise dos cenários baseados em instâncias artificiais, também apresentados na tabela 15. O objetivo deste experimento é trazer uma perspectiva de tempo de execução, conforme a base de entrada do modelo aumenta em tamanho.

O modelo foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação C++ em sua versão 17, com o resolvidor IBM Ilog CPLEX na versão 20.1.

O sistema utilizado foi um *WSL (Windows Subsystem for Linux)*, rodando um sistema *Debian*, com 16gb de memória ram e 6 núcleos de processamento, em um ryzen 5 5600x de 3700 MHz.

Nas configurações do resolvidor, com o objetivo de diminuir o tempo de soluções para instâncias mais complexas, foi adotado um valor máximo para o *gap* relativo de 0,5%.

7.2 Resultados do primeiro grupo de instâncias: farmacológica

Nesta seção serão apresentados os resultados referentes aos cenários farmacológicos e os possíveis ganhos oriundos do benefício fiscal de crédito presumido oferecido pelo PRODEPE, conforme publicado pelo DOE (1999) e descrito na seção 6.2.

Através da tabela 16, pode-se observar os principais resultados dos experimentos desta seção.

Tabela 16 – Resumo de resultados dos cenários farmacocômicos

Métrica	F-SBF-SRC	F-SBF-CRC	F-CBF-SRC	F-CBF-CRC
Tempo total do resolvedor	00h 12m 55s	00h 00m 00s	00h 18m 09s	00h 00m 00s
Tempo de callback	00h 00m 00s	00h 00m 00s	00h 00m 00s	00h 00m 00s
<i>gap</i> relativo	0,0018%	0,0000%	0,0921%	0,0000%
Resultado FO	68.117.768	0	65.281.350	0
Total custos ICMS	19.517.397	0	7.460.841	0
Total custos fixos	18.534.324	0	18.534.324	0
Total custos variáveis	30.066.047	0	39.286.185	0
Peso variáveis w	0	0	0	0

Fonte: Estível Ramos Jr

A coluna *Métrica* da tabela acima indica cada uma das principais medidas que foram utilizadas, e as demais colunas indicam os valores encontrados para os cenários F-SBF-SRC, F-SBF-CRC, F-CBF-SRC e F-CBF-CRC, conforme descritos na tabela 15 exposta no início deste capítulo. A primeira medida, *Tempo total do resolvedor*, não engloba o tempo de leitura, tratamento e exportação de dados, porém engloba a próxima métrica *Tempo de callback*, que é o tempo que o resolvedor levou para resolver o problema da *callback* de remoção de circuitos, conforme exposto na seção 5.2.9. A métrica *MIP gap relativo* indica qual o *gap* da solução final entre o melhor resultado inteiro e o melhor resultado da solução relaxada encontrada. Mais detalhes sobre essa métrica podem ser consultados na documentação do resolvedor adotado, o IBM Ilog CPLEX, na página do fabricante IBM (2022b).

Resultado FO é o valor da solução encontrada para a função objetivo, conforme o modelo sem remoção de circuitos da seção 5.4.1 para os cenários F-SBF-SRC e F-CBF-SRC, e conforme o modelo com remoção de circuitos da seção 5.4.2 para os cenários F-SBF-CRC e F-CBF-CRC. O *Custo total ICMS* indica a soma dos saldos de ICMS de cada UF, conforme restrição descrita na seção 5.2.4. *Total custos fixos* e *Total custos variáveis* seguem conforme descrito na seção 5.3.2, onde os custos fixos são compostos pelo custo fixo de operação de cada localidade, sendo este associado as variáveis binárias x . Os custos variáveis, para essa instância são compostos pelos fretes e estão associados às variáveis y . O *Peso variáveis w* é o custo associado as variáveis w , que são necessárias apenas para quando as restrições de circuitos são utilizadas via *callback*, conforme definido na seção 5.2.9.

7.2.1 Desenho logístico do resultado

A tabela 17 mostra como o volume entre os dois cenários se diferencia. Para as fábricas, o cenários F-SBF-SRC deixa a fábrica de SC como a última opção, de forma que é a fábrica com menos volume alocado. Já o cenário F-SBF-SRC deixa a fábrica do RJ como sendo a fábrica com volume abaixo da capacidade. Note que mesmo que haja uma mudança de volume entre os dois cenários, o desenho da malha no que tange as fábricas continua o mesmo, o que não ocorre para o Centros de Distribuição, uma vez que o cenário F-SBF-SRC não utiliza o CD de PE mas utiliza o CD de MG e o cenário F-CBF-SRC escolhe o inverso, deixando o CD de MG fechado e abrindo um CD em PE. A escolha de abrir um cd em PE que é feita pelo cenários F-CBF-SRC é totalmente pertinente, uma vez que o cenário F-CBF-SRC possui desconto fiscal através do PRODEPE.

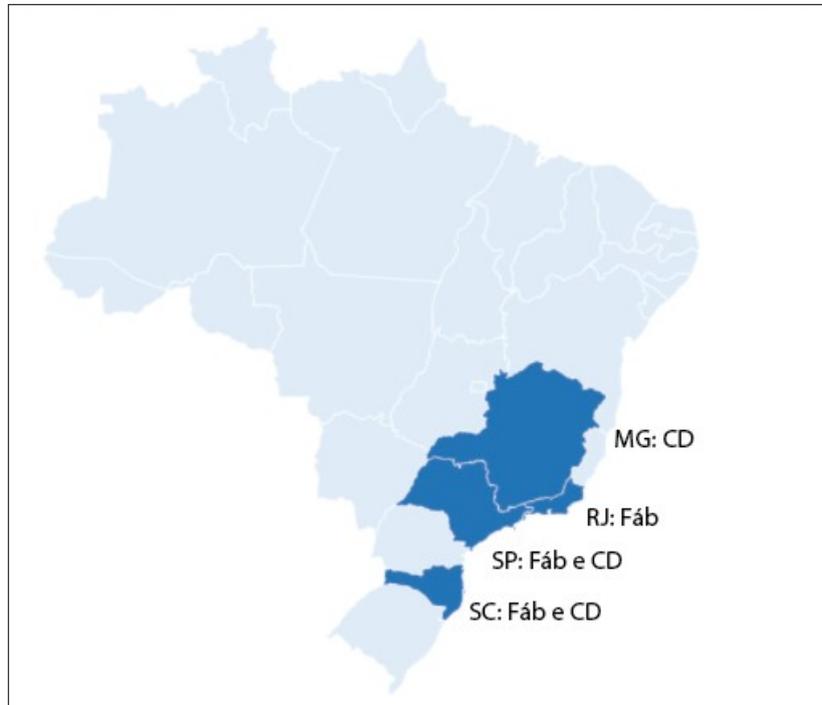
Tabela 17 – Volume de cada localidade por cenário farmacológico

Tipo de Localidade	UF	Volume F-SBF-SRC	Volume F-CBF-SRC
Fábrica	RJ	10.000.000	8.420.408
Fábrica	SC	8.420.408	10.000.000
Fábrica	SP	10.000.000	10.000.000
Centro de Distribuição	PE	0	8.482.035
Centro de Distribuição	SC	8.420.408	9.938.373
Centro de Distribuição	SP	10.000.000	10.000.000
Centro de Distribuição	MG	10.000.000	0

Fonte: Estível Ramos Jr

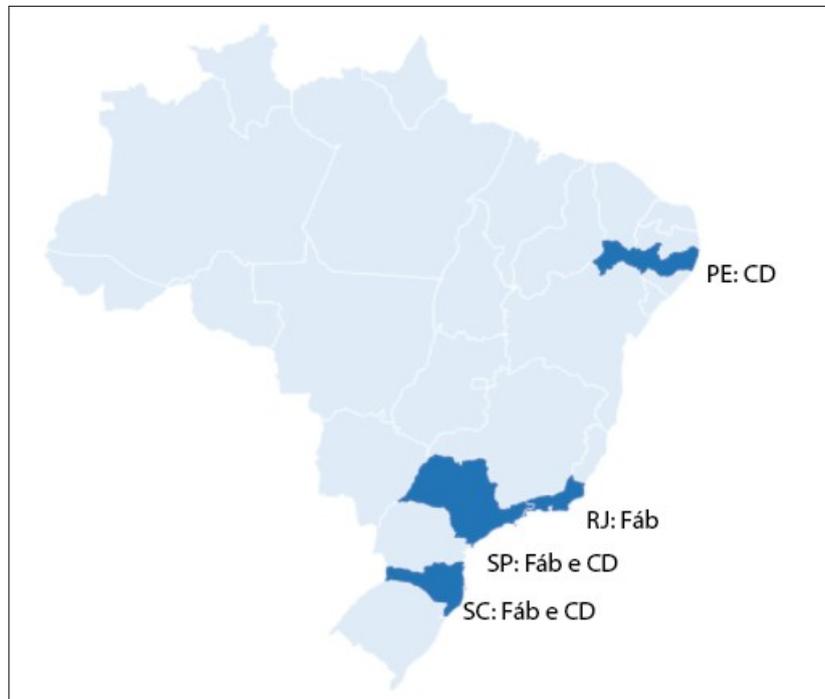
A figuras 16 e 17 são uma indicação visual do resultado obtido pelo modelo para os cenários F-SBF-SRC e F-CBF-SRC, indicando em quais UFs estão as localidades escolhidas.

Figura 16 – F-SBF-SRC: UFs escolhidas para o cenário sem prodepe



Fonte: Estível Ramos Jr

Figura 17 – F-CBF-SRC - UFs escolhidas para o cenário com prodepe



Fonte: Estível Ramos Jr

7.2.2 Análise de resultado financeiro

Como não foram encontrados circuitos na solução (vide tabela 16), os resultados encontrados pelo modelo nos cenários F-SBF-CRC e F-CBF-CRC não são diferentes de seus pares F-SBF-SRC e F-CBF-SRC, desta forma, para a análise de resultados financeiros, apenas os cenários F-SBF-SRC e F-CBF-SRC são necessários.

Analisando os cenários F-SBF-SRC e F-CBF-SRC, sendo o primeiro sem benefício fiscal e o segundo com benefício fiscal, pode-se ver que o custo total da operação do cenário com benefício fiscal é menor do que o primeiro cenário. A tabela 18 exposta a seguir mostra a diferença entre os resultados encontrados, de forma financeira e percentual.

Tabela 18 – Comparativo de resultados entre cenários com e sem PRODEPE

	F-SBF-SRC	F-CBF-SRC	Diferença (R\$)	Diferença (%)
Resultado FO	68.117.768	65.281.350	-2.836.418	-4,16%
Total custos ICMS	19.517.397	7.460.841	-12.056.556	-61,77%
Total custos fixos	18.534.324	18.534.324	0	0,00%
Total custos variáveis	30.066.047	39.286.185	9.220.138	30,67%

Fonte: Estível Ramos Jr

Na tabela 19 podemos ver a diferença de ICMS em cada estado. No cenário F-CBF-SRC, que possui o desconto de ICMS em PE, atribui um débito final de R\$ 1.788.764 a PE, que no cenário F-SBF-SRC não possui nenhuma tributação. Também há um aumento de tributação no estado de SC, no montante de 561.663. Esse dois aumentos de tributação de ICMS são compensados pelas reduções que ocorrem em MG, no valor de R\$ -8.770.998, e também em SP, no valor de R\$ -5.635.984. No total consolidado, o cenário com benefício fiscal em PE possui uma redução de R\$ -12.056.555 em comparação ao cenário F-SBF-SRC. Essa alteração de tributação ocorre sem que haja mudança na demanda atendida porém existe uma penalidade no custo logístico (tabela 18), que passa a usar um Centro de Distribuição mais distante das principais praças de demanda (figura 15).

Tabela 19 – Comparativo de ICMS por UF entre cenários

UF	ICMS F-SBF-SRC	ICMS F-CBF-SRC	Diferença (R\$)
RO	0	0	0
AC	0	0	0
AM	0	0	0
RR	0	0	0
PA	0	0	0
AP	0	0	0
TO	0	0	0
MA	0	0	0
PI	0	0	0
CE	0	0	0
RN	0	0	0
PB	0	0	0
PE	0	1.788.764	1.788.764
AL	0	0	0
SE	0	0	0
BA	0	0	0
MG	8.770.998	0	-8.770.998
ES	0	0	0
RJ	0	0	0
SP	5.635.984	0	-5.635.984
PR	0	0	0
SC	5.110.414	5.672.077	561.663
RS	0	0	0
MS	0	0	0
MT	0	0	0
GO	0	0	0
DF	0	0	0
Total ICMS	19.517.396	7.460.841	-12.056.555

Fonte: Estível Ramos Jr

7.3 Resultados do segundo grupo de instâncias: artificiais

O estudo com instâncias artificiais tem por objetivo experimentar e catalogar o tempo de resolução dos modelos em função do tamanho e forma dos dados de entrada. Para isso foram criadas instâncias variando o tamanho de entrada nos diferentes níveis da rede, como definido na seção 6.3. A partir das instâncias criadas foram definidos dois cenários diferentes para cada uma delas, sendo um cenário para o modelo sem ciclos definido na seção 5.4.1 e outro para o modelo com ciclos definido na seção 5.4.2. A lista completa de cenários pode ser revista na tabela 15.

A seção 7.3.1 expõe de maneira geral os cenários analisados, enquanto que as seções 7.3.2, 7.3.3 e 7.3.4 mostram como os modelos se comportam conforme a variação do tamanho da entrada para o nível de centros de distribuição, níveis de clientes e o sortimento de produtos, respectivamente.

7.3.1 Resultados gerais

A tabela 20 expõe os resultados financeiros dos cenários artificiais. Neles podemos notar o efeito da retirada de circuitos tributários, onde os cenários do tipo CRC (Com Remoção de Ciclos) possuem valores de mais elevados de que seus pares SRC (Sem Remoção de Ciclos).

Tabela 20 – Resultados dos cenários artificiais

ID cenário	resultado FO	custo ICMS	custos fixos	custos variáveis
A-BASE-SRC	224.745.329	7.164.800	7.364	217.573.165
A-BASE-CRC	230.138.238	7.254.000	7.364	222.876.873
A-CD-01-SRC	207.155.754	3.668.600	7.787	203.479.367
A-CD-01-CRC	209.578.139	6.044.120	7.787	203.526.230
A-CD-02-SRC	210.175.159	11.752.378	8.609	198.414.171
A-CD-02-CRC	211.270.866	11.693.783	8.609	199.568.473
A-CD-03-SRC	197.716.000	6.910.384	10.931	190.794.685
A-CD-03-CRC	197.968.035	6.768.370	10.931	191.188.733
A-CD-04-SRC	180.215.721	0	15.563	180.200.158
A-CD-04-CRC	180.270.212	0	15.563	180.254.649
A-CLI-01-SRC	233.665.732	12.998.444	12.416	220.654.872
A-CLI-01-CRC	239.046.083	13.268.136	12.416	225.765.529
A-CLI-02-SRC	224.063.582	7.330.715	23.864	216.709.002
A-CLI-02-CRC	229.312.244	7.558.198	23.864	221.730.178
A-CLI-03-SRC	230.726.284	11.293.800	45.266	219.387.218
A-CLI-03-CRC	235.186.119	11.066.748	45.266	224.074.100
A-CLI-04-SRC	238.291.221	14.783.923	89.975	223.417.323
A-CLI-04-CRC	243.049.561	15.360.829	89.975	227.598.752
A-PROD-01-SRC	228.410.093	4.002.542	7.395	224.400.155
A-PROD-01-CRC	235.856.002	8.928.387	7.395	226.920.219
A-PROD-02-SRC	230.086.863	10.957.500	7.263	219.122.100
A-PROD-02-CRC	236.331.661	11.292.100	7.161	225.032.400
A-PROD-03-SRC	234.538.827	13.116.200	7.102	221.415.525
A-PROD-03-CRC	239.997.005	12.948.116	6.922	227.041.967
A-PROD-04-SRC	229.676.247	10.811.980	6.994	218.857.273
A-PROD-04-CRC	236.689.681	12.980.999	6.994	223.701.684

Fonte: Estível Ramos Jr

A tabela 21 contém métricas relativas ao resolvidor, sendo estas o *gap* relativo ao final da otimização, o tempo de solução do resolvidor em segundos e o tempo de *callback* para remoção de circuitos também em segundos, sendo que o tempo de *callback* está contido no tempo de solução do resolvidor. Pode-se observar na tabela 21 como os cenários com remoção de circuitos terminam com um *gap* relativo mais próximo ao limite configurado no resolvidor, de 0,5%, bem como os tempos totais são mais altos do que seu pares sem remoção de circuitos. Os tempos de solução serão analisados nas próximas seções

Tabela 21 – Métricas de solução dos cenários artificiais

ID cenário	gap relativo	Tempo resolvidor (seg)	Tempo callback (seg)
A-BASE-SRC	0,000%	1,20	0,00
A-BASE-CRC	0,413%	6,12	4,55
A-CD-01-SRC	0,001%	2,97	0,00
A-CD-01-CRC	0,405%	29,29	26,17
A-CD-02-SRC	0,001%	5,89	0,00
A-CD-02-CRC	0,412%	246,78	239,34
A-CD-03-SRC	0,003%	29,15	0,00
A-CD-03-CRC	0,130%	4.631,21	4.603,59
A-CD-04-SRC	0,005%	118,32	0,00
A-CD-04-CRC	0,036%	32.179,95	32.087,89
A-CLI-01-SRC	0,000%	1,47	0,00
A-CLI-01-CRC	0,436%	11,31	8,36
A-CLI-02-SRC	0,001%	3,60	0,00
A-CLI-02-CRC	0,208%	25,91	17,61
A-CLI-03-SRC	0,001%	8,28	0,00
A-CLI-03-CRC	0,104%	48,12	29,05
A-CLI-04-SRC	0,001%	21,42	0,00
A-CLI-04-CRC	0,383%	110,37	75,79
A-PROD-01-SRC	0,001%	1,87	0,00
A-PROD-01-CRC	0,458%	11,67	7,40
A-PROD-02-SRC	0,000%	4,64	0,00
A-PROD-02-CRC	0,472%	22,83	14,92
A-PROD-03-SRC	0,000%	14,73	0,00
A-PROD-03-CRC	0,293%	56,24	29,26
A-PROD-04-SRC	0,000%	47,50	0,00
A-PROD-04-CRC	0,427%	158,32	59,81

Fonte: Estível Ramos Jr

7.3.2 Variação da quantidade de arcos de nível CD

Esta seção aborda um comparativo entre os cenários que variam a quantidade de centros de distribuição.

Na tabela 22 tem-se uma comparação entre os cenários, indicando como o tempo de solução entre os dois modelos, SRC e CRC, variam conforme a quantidade de CDs na base de entrada. A coluna arcos CD indica a quantidade de CDs em cada cenário. E as colunas de passo indicam como o tempo solução aumenta em relação ao cenário anterior. Para esse grupo de instâncias, pode-se notar que o passo médio para cenários que rodaram com o modelo CRC é maior do que o passo médio para os cenários que rodaram com o modelo SRC, ou seja, o modelo com remoção de circuitos fica mais lento de forma mais rápida a medida que o número de CDs aumenta.

Tabela 22 – Variação de tempo de solução entre modelos em função da quantidade de arcos em nível CD nos dados de entrada

ID instância	arcos CD	tempo resolvidor SRC (seg)	tempo resolvidor CRC (seg)	passo SRC (%)	passo CRC (%)
A-BASE	10	1,2	6,12	-	-
A-CD-01	20	2,97	29,29	148%	379%
A-CD-02	40	5,89	246,78	98%	743%
A-CD-03	80	29,15	4631,21	395%	1777%
A-CD-04	160	118,32	32179,95	306%	595%
Média				237%	873%

Fonte: Estível Ramos Jr

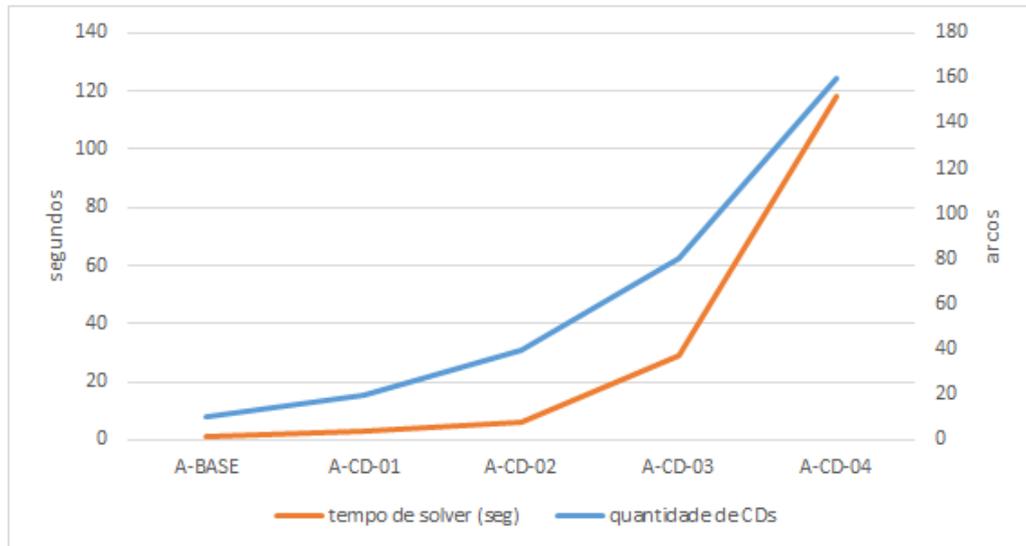
Tabela 23 – Tempo de *callback* para cenários com restrição de circuitos em função da quantidade de arcos CD nos dados de entrada

ID instância	arcos CD	tempo resolvidor (seg)	tempo callback (seg)	proporção por resolvidor	callback
A-BASE	10	6,12	4,55	74,3%	
A-CD-01	20	29,29	26,17	89,3%	
A-CD-02	40	246,78	239,34	97,0%	
A-CD-03	80	4.631,21	4.603,59	99,4%	
A-CD-04	160	32.179,95	32.087,89	99,7%	

Fonte: Estível Ramos Jr

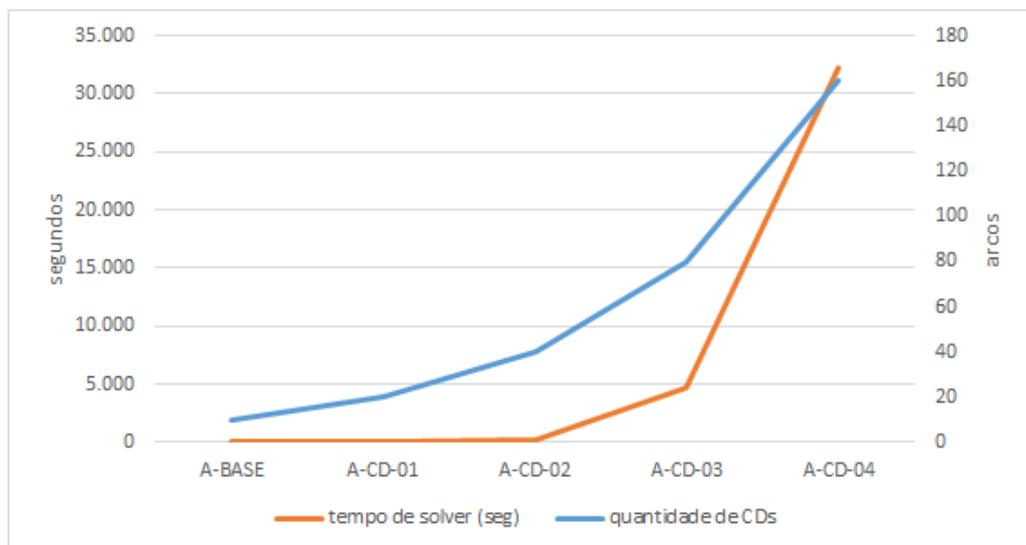
As figuras 18 e 19 indicam como o tempo de solução varia em função da quantidade de centros de distribuição, para os modelos sem remoção de circuitos e com remoção de circuitos, respectivamente.

Figura 18 – Variação em número de arcos CD - sem restrição de circuitos



Fonte: Estível Ramos Jr

Figura 19 – Variação em número de arcos CD - com restrição de circuitos



Fonte: Estível Ramos Jr

7.3.3 Variação da quantidade de arcos de nível cliente

Esta seção faz um comparativo entre os cenários que variam a quantidade de clientes.

Na tabela 24 tem-se uma comparação entre os cenários, indicando como o tempo de solução entre os dois modelos, SRC e CRC, varia conforme a quantidade de CDs na base de entrada. A coluna arcos CD indica a quantidade de CDs em cada cenário e as colunas de passo indicam como o tempo solução aumenta em relação ao cenário anterior.

Para esse grupo de instâncias, pode-se notar que o passo médio para cenários que rodaram com o modelo CRC é praticamente igual ao passo médio para os cenários que rodaram com o modelo SRC.

Tabela 24 – Variação de tempo de solução entre modelos em função da quantidade de arcos em nível cliente nos dados de entrada

ID instância	arcos cliente	tempo resolvidor SRC (seg)	tempo resolvidor CRC (seg)	passo SRC (%)	passo CRC (%)
A-BASE	100	1,2	6,12	0	0
A-CLI-01	200	1,48	13,03	23%	113%
A-CLI-02	400	3,6	25,91	143%	99%
A-CLI-03	800	8,28	48,12	130%	86%
A-CLI-04	1600	21,42	110,37	159%	129%
Média				114%	107%

Fonte: Estível Ramos Jr

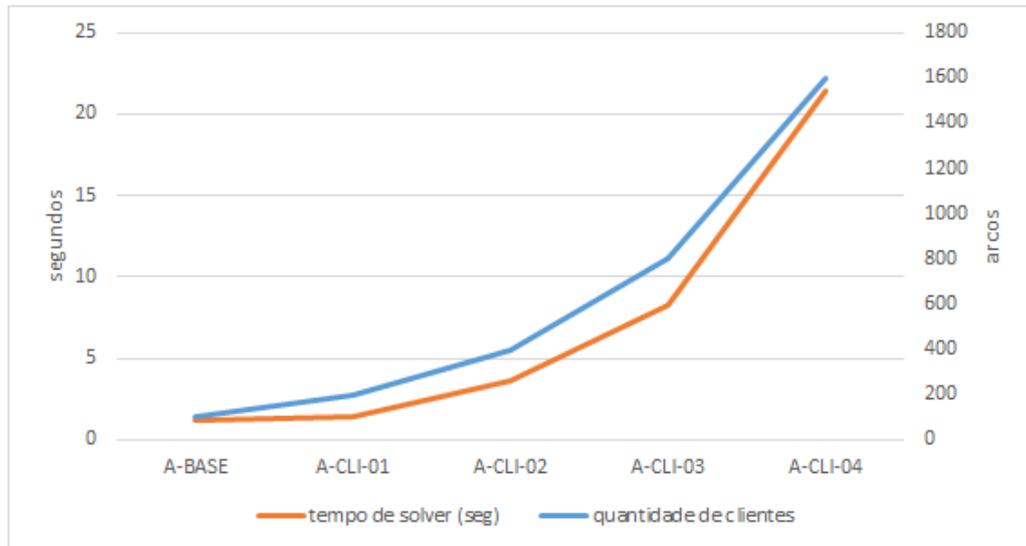
Tabela 25 – Tempo de *callback* para cenários com restrição de circuitos em função da quantidade de arcos cliente nos dados de entrada

ID instância	arcos cliente	tempo resolvidor (seg)	tempo callback (seg)	proporção callback por resolvidor
A-BASE	100	6,12	4,55	74,3%
A-CLI-01	200	13,03	10,23	78,5%
A-CLI-02	400	25,91	17,61	67,9%
A-CLI-03	800	48,12	29,05	60,4%
A-CLI-04	1600	110,37	75,79	68,7%

Fonte: Estível Ramos Jr

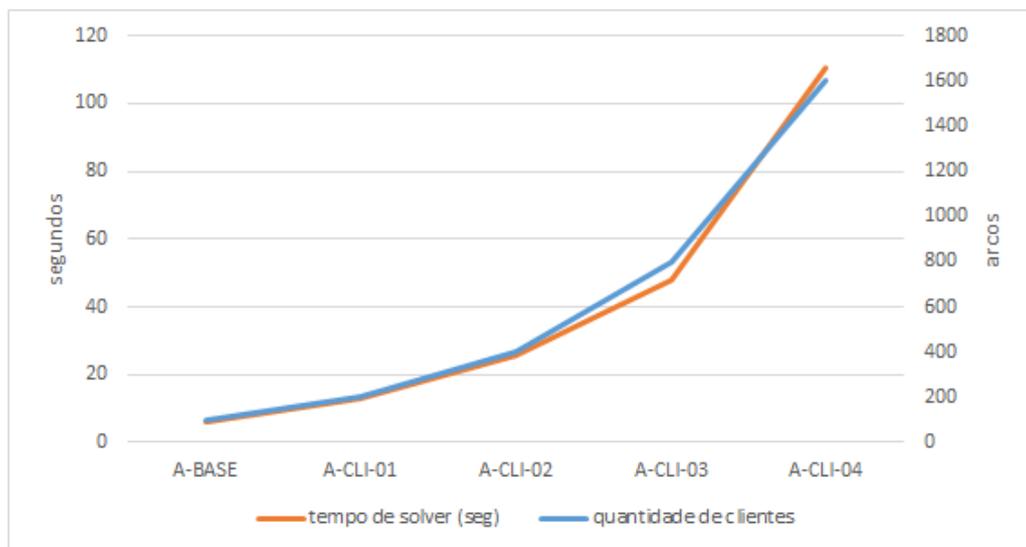
As figuras 20 e 21 indicam como o tempo de solução varia em função da quantidade de clientes, para os modelos sem remoção de circuitos e com remoção de circuitos, respectivamente.

Figura 20 – Variação em número de arcos cliente - sem restrição de circuitos



Fonte: Estível Ramos Jr

Figura 21 – Variação em número de arcos cliente - com restrição de circuitos



Fonte: Estível Ramos Jr

7.3.4 Variação da quantidade de produtos

Esta seção trás um comparativo entre os cenários que variam a quantidade de produtos que circulam na rede.

Na tabela 26 tem-se uma comparação entre os cenários, indicando como o tempo de solução entre os dois modelos, SRC e CRC, variam conforme a quantidade de CDs na base de entrada. A coluna arcos CD indica a quantidade de CDs em cada cenário. E as colunas de passo indicam como o tempo solução aumenta em relação ao cenário anterior.

Para esse grupo de instâncias, pode-se notar que o passo médio para cenários que rodaram com o modelo CRC é praticamente igual ao passo médio para os cenários que rodaram com o modelo SRC.

Tabela 26 – Variação de tempo de solução entre modelos em função da quantidade de produtos nos dados de entrada

ID instância	qnt produtos	tempo resolvidor SRC (seg)	tempo resolvidor CRC (seg)	passo SRC (%)	passo CRC (%)
A-BASE	25	1,2	6,12	0	0
A-PROD-01	50	1,87	11,67	56%	91%
A-PROD-02	100	4,64	22,83	148%	96%
A-PROD-03	200	14,73	56,24	217%	146%
A-PROD-04	400	47,5	158,32	222%	182%
Média				161%	129%

Fonte: Estível Ramos Jr

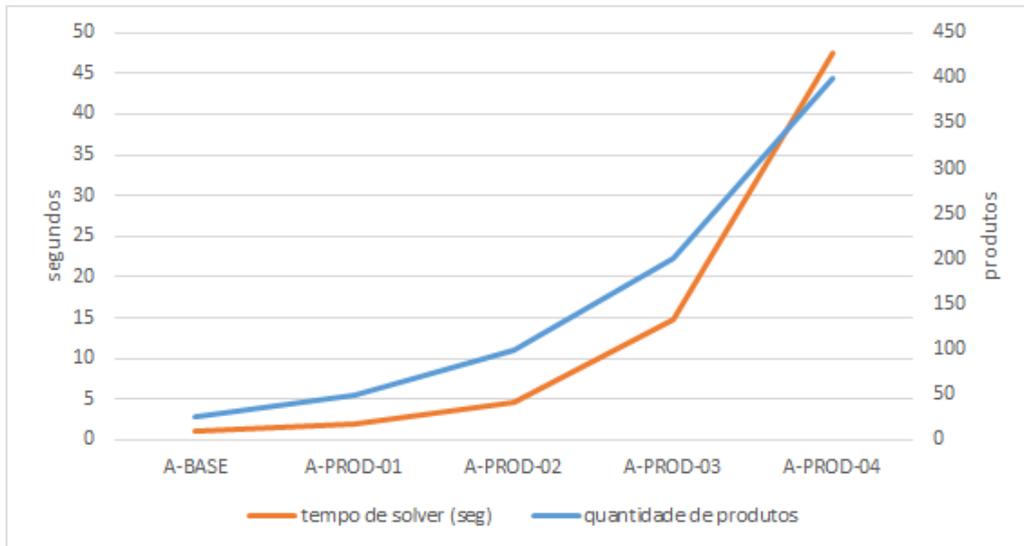
Tabela 27 – Tempo de *callback* para cenários com restrição de circuitos em função da quantidade de produtos nos dados de entrada

ID instância	qnt produtos	tempo resolvidor (seg)	tempo callback (seg)	proporção callback por resolvidor
A-BASE	25	6,12	4,55	74,3%
A-PROD-01	50	11,67	7,40	63,4%
A-PROD-02	100	22,83	14,92	65,4%
A-PROD-03	200	56,24	29,26	52,0%
A-PROD-04	400	158,32	59,81	37,8%

Fonte: Estível Ramos Jr

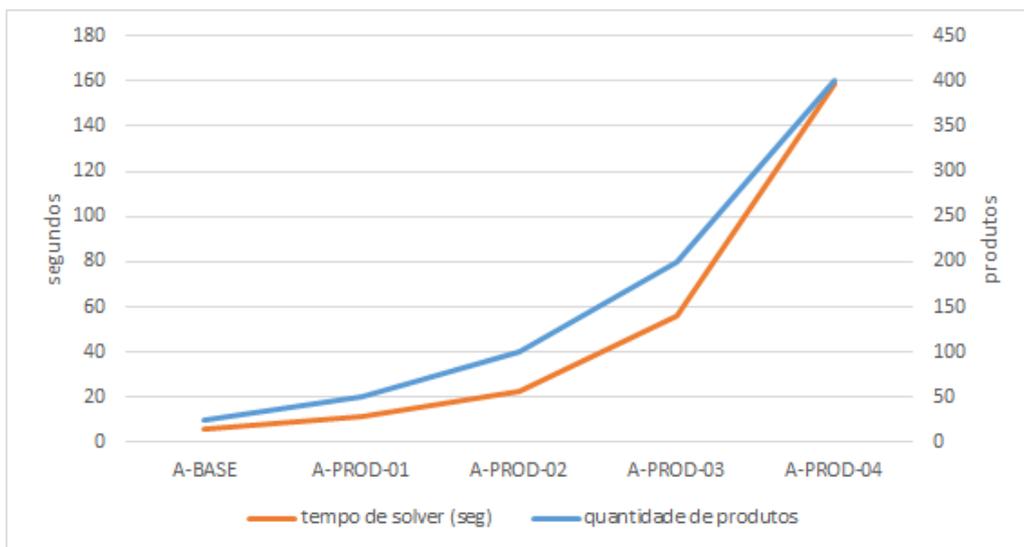
As figuras 22 e 23 indicam como o tempo de solução varia em função da quantidade de produtos, para os modelos sem remoção de circuitos e com remoção de circuitos, respectivamente.

Figura 22 – Variação em número de arcos produtos - sem restrição de circuitos



Fonte: Estível Ramos Jr

Figura 23 – Variação em número de arcos produtos - com restrição de circuitos



Fonte: Estível Ramos Jr

8 Conclusão e trabalhos futuros

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre projetos de redes de cadeias de suprimentos (*supply chain network design*), com foco na redução de custos através do melhor equilíbrio entre os custos logísticos e tributários. Foi enfatizado que durante o processo de redução de custos tributários, rotas não desejadas podem ocorrer e assim formar um circuito interno na rede, de forma que os custos tributários são reduzidos na solução. Porém sendo esta uma estrutura não permitida em aplicações reais durante o processo de apuração tributária, tal movimento é restringido no segundo modelo proposto.

Foram desenvolvidos dois modelos e dois grupos de experimentos. O primeiro grupo de experimentos foi desenvolvido a partir de uma base de dados reais extraída de uma indústria farmacocômica. Seu objetivo foi avaliar o benefício fiscal oferecido pelo estado de Pernambuco através do PRODEPE, e o equilíbrio logístico tributário. No segundo grupo de experimentos foram criadas instâncias artificiais visando medir a performance do modelo e o impacto que a restrição de remoção de ciclos exerce sobre o tempo de resolução e na qualidade dos resultados.

O experimento realizado no primeiro grupo mostrou quantitativamente que o benefício fiscal oferecido em Pernambuco é vantajoso, mesmo com a maior parte da demanda estando no sudeste do país. Apesar dos custos logísticos aumentarem, a redução no custo tributário é ainda maior, viabilizando uma instalação logística no nordeste.

Já os experimentos realizados com instâncias artificiais mostraram como a restrição do tipo *lazy* para identificação e remoção de circuitos pode deixar o modelo significativamente mais lento, porém ainda factível para bases com quantidades de localidades e produtos dentro de um cenário realista.

Para estudos futuros, recomenda-se uma comparação entre o modelo de remoção de circuitos proposto neste trabalho, com modelos do tipo *caminho completo*, que apesar de possuírem uma quantidade de variáveis mais elevada, não possibilita a criação de circuitos.

Referências¹

- AGRA, A.; DOOSTMOHAMMADI, M.; LOUVEAUX, Q. Valid inequalities for the single arc design problem with set-ups. *Discrete Optimization*, v. 16, p. 17–35, 2015. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84921721226&doi=10.1016%2Fj.disopt.2014.12.002&partnerID=40&md5=16f4d3c9752fbcbe62dcece57c0d6e0a>. Citado na página 45.
- ANTT. *ANTTlegis*. 2022. Disponível em: https://anttlegis.antt.gov.br/action/UrlPublicasAction.php?acao=abrirAtoPublico&cod_modulo=161&cod_menu=6616&num_ato=00005867&sgl_tipo=RES&sgl_orgao=DG/ANTT/MI&vlr_ano=2020&seq_ato=000. Citado na página 73.
- ARMAN, A.; TSATURIAN, S. The maximum number of cycles in a graph with fixed number of edges. *arXiv preprint arXiv:1702.02662*, 2017. Citado na página 61.
- CHOPRA, S.; MEINDL, P. *Gestão da Cadeia de Suprimentos: estratégia, planejamento e operações*. 4ª. ed. [S.l.]: Pearson Education do Brasil, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 15, 32 e 33.
- CONFORTI, M.; CORNUEJOLS, G.; ZAMBELLI, G. *Integer Programming*. [S.l.]: Springer Publishing Company, Incorporated, 2014. ISBN 3319110071. Citado 7 vezes nas páginas 24, 25, 26, 28, 29, 30 e 31.
- CORMEN, T. H.; LEISERSON, C. E.; RIVEST, R. L.; STEIN, C. *Introduction to Algorithms, 3rd Edition*. MIT Press, 2009. ISBN 978-0-262-03384-8. Disponível em: <http://mitpress.mit.edu/books/introduction-algorithms>. Citado na página 60.
- DIESTEL, R. *Graph Theory*. [S.l.]: Springer Publishing Company, Incorporated, 2017. ISBN 978-3-662-53621-6. Citado 4 vezes nas páginas 20, 21, 22 e 23.
- DOE. Decreto nº 21.959, de 27 de dezembro de 1999. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 1999. ISSN 1677-7042. Disponível em: https://www.sefaz.pe.gov.br/Legislacao/Tributaria/Documents/legislacao/decretos/1999/Dec21959_99.htm. Citado 2 vezes nas páginas 76 e 80.
- GABOW, H. N. Path-based depth-rst search for strong and biconnected components. *Information Processing Letters*, 2000. Citado na página 60.
- GENDRON, B.; CRAINIC, T. G.; FRANGIONI, A. Multicommodity capacitated network design. In: _____. *Telecommunications Network Planning*. Boston, MA: Springer US, 1999. p. 1–19. ISBN 978-1-4615-5087-7. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5087-7_1. Citado na página 51.
- GONZÁLEZ, P.; SIMONETTI, L.; MARTINHON, C. de J.; SANTOS, E.; MICHELON, P. A relax and fix approach to solve the fixed charge network design problem with user-optimal flow. *Communications in Computer and Information Science*, v. 509, p. 173–185, 2015. Disponível em: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84929614017&doi=10.1007%2F978-3-319-17509-6_12&partnerID=40&md5=b75d9c1c75579c142313bb3b474d214d. Citado na página 45.

¹ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

HARAHAP, A.; MAWENKANG, H.; EFENDI, S. *et al.* An integer programming model for multi-echelon supply chain decision problem considering inventories. *MS&E*, v. 300, n. 1, p. 012026, 2018. Citado na página 45.

IBM. *IBM Docs: lazy constraint, pool, user cut*. 2022. Disponível em: <https://www.ibm.com/docs/en/icos/20.1.0?topic=techniques-user-cut-lazy-constraint-pools>. Citado na página 61.

IBM. *IBM Docs: relative MIP gap tolerance*. 2022. Disponível em: <https://www.ibm.com/docs/en/icos/12.9.0?topic=parameters-relative-mip-gap-tolerance>. Citado na página 81.

JIANG, Y.; GROSSMANN, I. Alternative mixed-integer linear programming models of a maritime inventory routing problem. *Computers and Chemical Engineering*, v. 77, p. 147–161, 2015. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84928654020&doi=10.1016%2fj.compchemeng.2015.03.005&partnerID=40&md5=dba3df5c71e83c1668698ac97aa34cbc>. Citado na página 45.

JONHSON, D. B. The hop-constrained minimum cost flow spanning tree problem with nonlinear costs: an ant colony optimization approach. *Optimization Letters*, v. 9, n. 3, p. 451–464, 2015. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84924222121&doi=10.1007%2fs11590-014-0762-6&partnerID=40&md5=0ee6f9e4993c17c8ee7cf0257d007936>. Citado na página 60.

KATAYAMA, N. Mip neighborhood search heuristics for a capacitated fixed-charge network design problem. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, v. 37, n. 3, 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85085389452&doi=10.1142%2fS0217595920500098&partnerID=40&md5=64b7ded7b01e084f47bc3c03aed24ecc>. Citado na página 45.

LAUTERBACH, J. da P. *Otimização de configuração de cadeia de suprimentos com análise complementar de competitividade dos cenários*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 45.

LEAL, J. E. *Modelagem integrada para otimização da cadeia logística de combustíveis no Brasil*. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2018. Citado na página 45.

MAGNANTI, T. L.; WONG, R. T. Network design and transportation planning: Models and algorithms. *Transportation Science*, v. 18, n. 1, p. 1–55, 1984. Disponível em: <https://doi.org/10.1287/trsc.18.1.1>. Citado 3 vezes nas páginas 50, 51 e 52.

MARIANI, A. C. *Teoria dos Grafos*. 2022. Disponível em: <https://www.inf.ufsc.br/grafos/livro.html>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 24.

MOHAMMADI, M.; JÄMSÄ-JOUNELA, S.-L.; HARJUNKOSKI, I. Sustainable supply chain network design for the optimal utilization of municipal solid waste. *AIChE Journal*, Wiley Online Library, v. 65, n. 7, p. e16464, 2019. Citado na página 45.

MOHEBALIZADEHGASHTI, F.; ZOLFAGHARINIA, H.; AMIN, S. H. Designing a green meat supply chain network: A multi-objective approach. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 219, p. 312–327, 2020. Citado na página 45.

PAPADIMITRIOU, D.; FORTZ, B.; GORGONE, E. Lagrangian relaxation for the time-dependent combined network design and routing problem. In: . [s.n.], 2015. v. 2015-September, p. 6030–6036. Disponível em: (<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84953729021&doi=10.1109%2fICC.2015.7249283&partnerID=40&md5=9c823d218f71c48554ae03caccdafe9b>). Citado na página 45.

SANTO, D. P. do E. *A Influência do Planejamento Tributário no Desenho da Rede de Distribuição e na Localização de Centros de Distribuição*. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2015. Citado na página 45.

SANTOS, R. d. B. M. *et al.* Desenho de redes de suprimentos com o auxílio de planilha eletrônica e simulação computacional. [sn], 2018. Citado na página 45.

SHANKAR, R.; BHATTACHARYYA, S.; CHOUDHARY, A. A decision model for a strategic closed-loop supply chain to reclaim end-of-life vehicles. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 195, p. 273–286, 2018. Citado na página 45.

SILVA, M. B. da. *Otimização de redes de distribuição física considerando incentivo fiscal baseado em incetivo fiscal baseado no crédito presumido do ICMS*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007. Citado na página 16.

TARJAN, R. Depth-first search and linear graph algorithms. *SIAM journal on computing*, SIAM, v. 1, n. 2, p. 146–160, 1972. Citado na página 60.

Apêndice A – Dados para cálculo de fretes

A seguir são expostos os dados utilizados na seção 6.2.2.

Quadro 9 – Matriz de distancias (km) (1 de 3)

	AC	AL	AM	AP	BA	CE	DF	ES	GO
AC	300	5.039	1.445	4.469	4.457	5.396	3.123	4.109	2.924
AL	5.039	300	5.491	2.630	632	1.075	1.928	1.684	2.105
AM	1.445	5.491	300	3.070	5.009	5.763	3.490	4.476	3.291
AP	4.469	2.630	3.070	300	2.670	2.111	2.498	3.400	2.519
BA	4.457	632	5.009	2.670	300	1.389	1.446	1.202	1.643
CE	5.396	1.075	5.763	2.111	1.389	300	2.208	2.397	2.482
DF	3.123	1.930	3.490	2.498	1.446	2.200	300	1.239	209
ES	4.109	1.684	4.476	3.400	1.202	2.397	1.238	300	1.428
GO	2.924	2.125	3.291	2.519	1.643	2.482	209	1.428	300
MA	4.968	1.672	5.335	1.121	1.599	1.070	2.157	2.607	2.054
MG	3.584	1.854	3.951	3.219	1.372	2.528	716	524	906
MS	2.684	3.040	3.051	3.354	2.568	3.407	1.134	1.892	935
MT	1.990	3.049	2.357	3.046	2.566	3.406	1.133	2.119	934
PA	4.931	2.173	5.298	539	2.100	1.610	2.120	3.108	2.017
PB	5.356	395	5.808	2.778	949	688	2.245	2.001	2.442
PE	5.243	285	5.698	2.571	839	800	2.135	1.891	2.332
PI	4.900	1.236	5.267	1.443	1.163	634	1.789	2.171	1.986
PR	3.669	2.871	4.036	3.845	2.385	3.541	1.366	1.300	1.186
RJ	4.007	2.131	4.374	3.668	1.649	2.805	1.148	521	1.338
RN	5.533	572	5.985	2.626	1.126	537	2.422	2.178	2.619
RO	544	4.505	901	3.956	4.023	4.865	2.589	3.575	2.390
RR	2.230	6.279	785	2.294	5.794	6.548	4.275	5.261	4.076
RS	4.196	3.572	4.563	4.571	3.090	4.242	2.027	2.001	1.847
SC	3.976	3.168	4.443	4.130	2.682	3.838	1.673	1.597	1.493
SE	4.763	294	5.215	2.595	356	1.183	1.652	1.408	1.848
SP	3.604	2.453	3.971	3.459	1.962	3.127	1.015	882	926
TO	3.764	1.851	4.141	1.759	1.454	2.035	973	2.214	874

Fonte: Estível Ramos Jr

Quadro 10 – Matriz de distancias (km) (2 de 3)

	MA	MG	MS	MT	PA	PB	PE	PI	PR
AC	4.968	3.584	2.684	1.990	4.931	5.356	5.243	4.900	3.669
AL	1.672	1.854	3.040	3.049	2.173	395	285	1.236	2.871
AM	5.335	3.951	3.051	2.357	5.298	5.808	5.698	5.267	4.036
AP	1.121	3.219	3.354	3.046	539	2.778	2.571	1.443	3.845
BA	1.599	1.372	2.568	2.567	2.100	949	839	1.163	2.385
CE	1.070	2.528	3.407	3.406	1.611	688	800	634	3.541
DF	2.157	741	1.134	1.133	2.140	2.245	2.135	1.789	1.366
ES	2.607	524	1.892	2.119	3.108	2.001	1.891	2.171	1.300
GO	2.054	906	935	934	2.017	2.442	2.332	1.986	1.186
MA	300	2.738	2.979	2.978	806	1.660	1.573	446	3.230
MG	2.738	300	1.453	1.594	2.824	2.171	2.061	2.302	1.004
MS	2.979	1.453	300	694	2.942	3.357	3.247	2.911	991
MT	2.978	1.594	694	300	2.941	3.366	3.255	2.910	1.679
PA	806	2.824	2.942	2.941	300	2.161	2.074	947	3.193
PB	1.660	2.171	3.357	3.366	2.161	300	120	1.224	3.188
PE	1.573	2.061	3.247	3.256	2.074	120	300	1.137	3.078
PI	446	2.302	2.911	2.910	947	1.224	1.137	300	3.143
PR	3.230	1.004	991	1.679	3.193	3.188	3.078	3.143	300
RJ	3.015	434	1.444	2.017	3.250	2.448	2.338	2.579	852
RN	1.607	2.348	3.537	3.543	2.108	185	297	1.171	3.365
RO	4.434	3.050	2.150	1.456	4.397	4.822	4.712	4.366	3.135
RR	6.120	4.736	3.836	3.142	6.083	6.593	6.483	6.052	4.821
RS	3.891	1.712	1.518	2.206	3.854	3.889	3.779	3.804	711
SC	3.537	1.301	1.298	1.986	3.500	3.485	3.375	3.450	300
SE	1.578	1.578	2.765	2.775	2.079	611	501	1.142	2.595
SP	2.970	586	1.014	1.614	2.933	2.770	2.660	2.792	408
TO	1.386	1.690	1.785	1.784	1.283	2.253	2.058	1.401	2.036

Fonte: Estível Ramos Jr

Quadro 11 – Matriz de distancias (km) (3 de 3)

	RJ	RN	RO	RR	RS	SC	SE	SP	TO
AC	4.007	5.533	544	2.230	4.196	3.976	4.763	3.604	3.764
AL	2.131	572	4.505	6.276	3.572	3.168	294	2.453	1.851
AM	4.374	5.985	901	785	4.563	4.343	5.215	3.971	4.141
AP	3.668	2.626	3.956	2.294	4.571	4.130	2.595	3.459	1.759
BA	1.649	1.126	4.023	5.749	3.090	2.682	356	1.962	1.454
CE	2.805	537	4.862	6.548	4.242	3.838	1.183	3.127	2.035
DF	1.148	2.422	2.589	4.275	2.027	1.673	1.650	1.015	973
ES	521	2.178	3.575	5.261	2.001	1.597	1.408	882	2.214
GO	1.338	2.618	2.390	4.076	1.847	1.493	1.849	926	874
MA	3.015	1.607	4.434	6.120	3.891	3.537	1.578	2.970	1.386
MG	434	2.348	3.050	4.736	1.712	1.301	1.578	586	1.690
MS	1.444	3.534	2.150	3.836	1.518	1.298	2.764	1.014	1.785
MT	2.017	3.543	1.456	3.142	2.206	1.986	2.773	1.614	1.784
PA	3.250	2.108	4.397	6.083	3.852	3.500	2.079	2.933	1.283
PB	2.448	185	4.822	6.539	3.889	3.485	611	2.770	2.253
PE	2.338	297	4.712	6.483	3.779	3.375	501	2.660	2.058
PI	2.579	1.171	4.366	6.052	3.804	3.450	1.142	2.792	1.401
PR	852	3.365	3.135	4.821	711	300	2.595	408	2.036
RJ	300	2.625	3.473	5.159	1.553	1.144	1.855	429	2.124
RN	2.625	300	4.998	6.770	4.066	3.662	788	2.947	2.345
RO	3.473	4.999	300	1.686	3.662	3.442	4.229	3.070	3.240
RR	5.159	6.770	1.686	300	5.348	5.128	6.000	4.756	4.926
RS	1.553	4.066	3.662	5.348	300	476	3.296	1.109	2.747
SC	1.144	3.662	3.442	5.128	476	300	2.892	705	2.336
SE	1.855	788	4.230	6.000	3.296	2.892	300	2.187	1.662
SP	429	2.947	3.070	4.756	1.109	705	2.188	300	1.776
TO	2.124	2.345	3.240	4.926	2.747	2.336	1.662	1.776	300

Fonte: Estível Ramos Jr

Quadro 12 – Matriz de fretes (R\$) (1 de 3)

	AC	AL	AM	AP	BA	CE	DF	ES	GO
AC	1.961	27.551	8.144	24.473	24.409	29.479	17.205	22.529	16.130
AL	27.551	1.961	29.992	14.543	3.754	6.146	10.752	9.434	11.708
AM	8.144	29.992	1.961	16.919	27.389	31.461	19.187	24.511	18.112
AP	24.473	14.543	16.919	1.961	14.759	11.740	13.830	18.701	13.943
BA	24.409	3.754	27.389	14.759	1.961	7.841	8.149	6.832	9.213
CE	29.479	6.146	31.461	11.740	7.841	1.961	12.264	13.285	13.744
DF	17.205	10.763	19.187	13.830	8.149	12.221	1.961	7.031	1.469
ES	22.529	9.434	24.511	18.701	6.832	13.285	7.026	1.961	8.052
GO	16.130	11.816	18.112	13.943	9.213	13.744	1.469	8.052	1.961
MA	27.168	9.370	29.150	6.394	8.975	6.119	11.989	14.419	11.432
MG	19.694	10.352	21.676	17.723	7.750	13.992	4.207	3.170	5.233
MS	14.834	16.757	16.816	18.452	14.208	18.739	6.464	10.558	5.390
MT	11.087	16.805	13.069	16.789	14.197	18.733	6.459	11.783	5.384
PA	26.968	12.075	28.950	3.251	11.681	9.035	11.789	17.124	11.233
PB	29.263	2.474	31.704	15.342	5.465	4.056	12.464	11.146	13.528
PE	28.653	1.880	31.110	14.224	4.871	4.661	11.870	10.552	12.934
PI	26.801	7.015	28.783	8.133	6.621	3.764	10.001	12.064	11.065
PR	20.153	15.844	22.135	21.104	13.220	19.462	7.717	7.361	6.745
RJ	21.979	11.848	23.960	20.148	9.245	15.488	6.540	3.154	7.566
RN	30.219	3.430	32.660	14.521	6.421	3.241	13.420	12.102	14.483
RO	3.278	24.668	5.206	21.703	22.065	26.612	14.321	19.646	13.247
RR	12.383	34.247	4.580	12.728	31.628	35.700	23.426	28.750	22.351
RS	22.999	19.630	24.981	25.024	17.027	23.248	11.287	11.146	10.315
SC	21.811	17.448	24.333	22.643	14.824	21.066	9.375	8.965	8.403
SE	26.061	1.928	28.502	14.354	2.263	6.729	9.262	7.944	10.320
SP	19.802	13.587	21.784	19.019	10.936	17.227	5.822	5.104	5.341
TO	20.666	10.336	22.702	9.839	8.192	11.330	5.595	12.296	5.060

Fonte: Estível Ramos Jr

Quadro 13 – Matriz de fretes (R\$) (2 de 3)

	MA	MG	MS	MT	PA	PB	PE	PI	PR
AC	27.168	19.694	14.834	11.087	26.968	29.263	28.653	26.801	20.153
AL	9.370	10.352	16.757	16.805	12.075	2.474	1.880	7.015	15.844
AM	29.150	21.676	16.816	13.069	28.950	31.704	31.110	28.783	22.135
AP	6.394	17.723	18.452	16.789	3.251	15.342	14.224	8.133	21.104
BA	8.975	7.750	14.208	14.203	11.681	5.465	4.871	6.621	13.220
CE	6.119	13.992	18.739	18.733	9.040	4.056	4.661	3.764	19.462
DF	11.989	4.342	6.464	6.459	11.897	12.464	11.870	10.001	7.717
ES	14.419	3.170	10.558	11.783	17.124	11.146	10.552	12.064	7.361
GO	11.432	5.233	5.390	5.384	11.233	13.528	12.934	11.065	6.745
MA	1.961	15.126	16.427	16.422	4.693	9.305	8.835	2.749	17.783
MG	15.126	1.961	8.187	8.948	15.590	12.064	11.470	12.772	5.762
MS	16.427	8.187	1.961	4.088	16.228	18.469	17.875	16.060	5.692
MT	16.422	8.948	4.088	1.961	16.222	18.517	17.918	16.055	9.407
PA	4.693	15.590	16.228	16.222	1.961	12.010	11.540	5.455	17.583
PB	9.305	12.064	18.469	18.517	12.010	1.961	989	6.950	17.556
PE	8.835	11.470	17.875	17.923	11.540	989	1.961	6.481	16.962
PI	2.749	12.772	16.060	16.055	5.455	6.950	6.481	1.961	17.313
PR	17.783	5.762	5.692	9.407	17.583	17.556	16.962	17.313	1.961
RJ	16.622	2.684	8.138	11.233	17.891	13.560	12.966	14.267	4.942
RN	9.019	13.020	19.441	19.473	11.724	1.340	1.945	6.664	18.512
RO	24.284	16.811	11.951	8.203	24.085	26.380	25.786	23.917	17.270
RR	33.389	25.915	21.055	17.308	33.189	35.943	35.349	33.022	26.374
RS	21.352	9.586	8.538	12.253	21.152	21.341	20.747	20.882	4.180
SC	19.441	7.366	7.350	11.065	19.241	19.160	18.566	18.971	1.961
SE	8.862	8.862	15.272	15.326	11.567	3.640	3.046	6.508	14.354
SP	16.379	3.505	5.816	9.056	16.179	15.299	14.705	15.418	2.544
TO	7.825	9.467	9.980	9.974	7.269	12.507	11.454	7.906	11.335

Fonte: Estível Ramos Jr

Quadro 14 – Matriz de fretes (R\$) (3 de 3)

	RJ	RN	RO	RR	RS	SC	SE	SP	TO
AC	21.979	30.219	3.278	12.383	22.999	21.811	26.061	19.802	20.666
AL	11.848	3.430	24.668	34.231	19.630	17.448	1.928	13.587	10.336
AM	23.960	32.660	5.206	4.580	24.981	23.793	28.502	21.784	22.702
AP	20.148	14.521	21.703	12.728	25.024	22.643	14.354	19.019	9.839
BA	9.245	6.421	22.065	31.385	17.027	14.824	2.263	10.936	8.192
CE	15.488	3.241	26.596	35.700	23.248	21.066	6.729	17.227	11.330
DF	6.540	13.420	14.321	23.426	11.287	9.375	9.251	5.822	5.595
ES	3.154	12.102	19.646	28.750	11.146	8.965	7.944	5.104	12.296
GO	7.566	14.478	13.247	22.351	10.315	8.403	10.325	5.341	5.060
MA	16.622	9.019	24.284	33.389	21.352	19.441	8.862	16.379	7.825
MG	2.684	13.020	16.811	25.915	9.586	7.366	8.862	3.505	9.467
MS	8.138	19.424	11.951	21.055	8.538	7.350	15.266	5.816	9.980
MT	11.233	19.473	8.203	17.308	12.253	11.065	15.315	9.056	9.974
PA	17.891	11.724	24.085	33.189	21.142	19.241	11.567	16.179	7.269
PB	13.560	1.340	26.380	35.651	21.341	19.160	3.640	15.299	12.507
PE	12.966	1.945	25.786	35.349	20.747	18.566	3.046	14.705	11.454
PI	14.267	6.664	23.917	33.022	20.882	18.971	6.508	15.418	7.906
PR	4.942	18.512	17.270	26.374	4.180	1.961	14.354	2.544	11.335
RJ	1.961	14.516	19.095	28.199	8.727	6.518	10.358	2.657	11.810
RN	14.516	1.961	27.330	36.899	22.297	20.116	4.596	16.255	13.004
RO	19.095	27.335	1.961	9.445	20.116	18.928	23.177	16.919	17.837
RR	28.199	36.899	9.445	1.961	29.220	28.032	32.741	26.023	26.941
RS	8.727	22.297	20.116	29.220	1.961	2.911	18.139	6.329	15.175
SC	6.518	20.116	18.928	28.032	2.911	1.961	15.958	4.148	12.955
SE	10.358	4.596	23.183	32.741	18.139	15.958	1.961	12.151	9.316
SP	2.657	16.255	16.919	26.023	6.329	4.148	12.156	1.961	9.931
TO	11.810	13.004	17.837	26.941	15.175	12.955	9.316	9.931	1.961

Fonte: Estível Ramos Jr

Apêndice B – Alíquotas de ICMS

Nos quadros a seguir estão as alíquotas utilizadas na seção 6.2.2. O quadro 15 contém as alíquotas de impostos federais, e os quadros 16 e 17 contém a matriz de alíquotas de ICMS, que é um imposto estadual.

Quadro 15 – Alíquotas de Impostos Federais

Imposto	Alíquota (%)
PIS	1,65
COFINS	7,60
IPI	10,00

Fonte: Estível Ramos Jr

Quadro 16 – Alíquotas de ICMS (%) (1 de 2)

	AC	AL	AM	AP	BA	CE	DF	ES	GO	MA	MT	MS	MG	PA
AC	17	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
AL	12	18	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
AM	12	12	18	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
AP	12	12	12	18	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
BA	12	12	12	12	18	12	12	12	12	12	12	12	12	12
CE	12	12	12	12	12	18	12	12	12	12	12	12	12	12
DF	12	12	12	12	12	12	18	12	12	12	12	12	12	12
ES	12	12	12	12	12	12	12	17	12	12	12	12	12	12
GO	12	12	12	12	12	12	12	12	17	12	12	12	12	12
MA	12	12	12	12	12	12	12	12	12	18	12	12	12	12
MT	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	17	12	12	12
MS	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	17	12	12
MG	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	18	7
PA	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	17
PB	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
PR	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
PE	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
PI	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
RN	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
RS	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	12	7
RJ	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	12	7
RO	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
RR	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
SC	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	12	7
SP	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	12	7
SE	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
TO	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Fonte: Estível Ramos Jr

Quadro 17 – Alíquotas de ICMS (%) (2 de 2)

	PB	PR	PE	PI	RN	RS	RJ	RO	RR	SC	SP	SE	TO
AC	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
AL	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
AM	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
AP	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
BA	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
CE	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
DF	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
ES	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
GO	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
MA	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
MT	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
MS	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
MG	7	12	7	7	7	12	12	7	7	12	12	7	7
PA	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
PB	18	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
PR	7	18	7	7	7	12	12	7	7	12	12	7	7
PE	12	12	18	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
PI	12	12	12	18	12	12	12	12	12	12	12	12	12
RN	12	12	12	12	18	12	12	12	12	12	12	12	12
RS	7	12	7	7	7	18	12	7	7	12	12	7	7
RJ	7	12	7	7	7	12	20	7	7	12	12	7	7
RO	12	12	12	12	12	12	12	18	12	12	12	12	12
RR	12	12	12	12	12	12	12	12	17	12	12	12	12
SC	7	12	7	7	7	12	12	7	7	17	12	7	7
SP	7	12	7	7	7	12	12	7	7	12	18	7	7
SE	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	18	12
TO	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	18

Fonte: Estível Ramos Jr