

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 com tributação.**

São Paulo

2021

ESTÍVEL RAMOS JÚNIOR

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

Projeto de pesquisa para exame de qualificação apresentado à Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos 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

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Freire

São Paulo

2021

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

-----  
**Prof. Dr.** -----  
Instituição: -----

-----  
**Prof. Dr.** -----  
Instituição: -----

-----  
**Prof. Dr.** -----  
Instituição: -----

## Resumo

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 as instalações e quais são os caminhos que os produtos devem percorrer para chegar ao cliente final. Essas escolhas são de longo de prazo e possuem um custo elevado para a implementação das instalações e apresentam certa flexibilidade para os fluxos de produtos. As decisões tomadas podem ser a favor de menor custo, da redução do tempo de atendimento ao cliente, ou uma combinação entre os dois. A tributação constitui um fator de grande relevância 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 da rede, que é o ICMS e seus derivados, como benefícios fiscais, substituição tributária e o diferencial de alíquotas.

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

## **Abstract**

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 can be to reduce the total cost of the network, increase the service level, or a mix of both. Taxes are a great part of the network design when its 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, that focuses on the tax that impacts the network the most, the ICMS and its pairs, as tax benefits, tax substitution, and rate difference.

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

## Lista de figuras

Figura 1 – Representação de uma localidade no grafo . . . . .	33
Figura 2 – Mecânica de saldo de ICMS considerando dois produtos $(A, B)$ . . . . .	35

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Resumo da condução da revisão sistemática antes de aplicar os critérios de qualidade . . . . .	26
Tabela 2 – Tipos de modelos e categorias de problema abordados pelos artigos selecionados na revisão sistemática. . . . .	28
Tabela 3 – Tipos de instâncias dos artigos selecionados na revisão sistemática. . .	29
Tabela 4 – Resolvedores de PLIM e estratégias utilizadas para otimização pelos artigos selecionados na revisão sistemática. . . . .	30
Tabela 5 – Custos e capacidades atribuídos para cada tipo de arco. . . . .	34
Tabela 6 – Cronograma de atividades proposta para o projeto de pesquisa. . . .	48

### **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

<b>1</b>	<b>Introdução . . . . .</b>	<b>11</b>
1.1	Área de Pesquisa . . . . .	11
1.2	Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos . . . . .	11
1.3	Motivação . . . . .	11
1.4	Lacuna . . . . .	12
1.5	Hipóteses . . . . .	12
1.6	Objetivos . . . . .	12
1.7	Justificativa . . . . .	13
1.8	Metodologia . . . . .	13
1.9	Avaliação . . . . .	13
1.9.1	Avaliação extrínseca . . . . .	14
1.9.2	Avaliação intrínseca . . . . .	14
1.10	Contribuições . . . . .	14
1.11	Escopo . . . . .	14
<b>2</b>	<b>O Problema do Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos com Tributação . . . . .</b>	<b>16</b>
2.1	Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos . . . . .	16
2.2	O impacto da tributação brasileira no Projeto de Redes de Cadeia de Suprimentos . . . . .	18
2.2.1	Impostos Federais . . . . .	18
2.2.2	Impostos Estaduais . . . . .	19
2.2.3	Benefícios Fiscais . . . . .	20
2.2.4	Exemplos de tipos de benefícios fiscais . . . . .	21
2.2.5	ICMS-ST: Substituição Tributária do ICMS . . . . .	22
2.2.6	Difal . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Revisão Sistemática . . . . .</b>	<b>24</b>
3.1	Protocolo . . . . .	24
3.1.1	Objetivo . . . . .	24
3.1.2	Questões de pesquisa . . . . .	24

3.1.3	Controle . . . . .	24
3.1.4	Resultados . . . . .	24
3.1.5	Seleção de fontes . . . . .	24
3.1.6	Palavras-chaves . . . . .	25
3.1.7	Listagem de fontes . . . . .	25
3.1.8	Critérios de inclusão e critérios de exclusão dos trabalhos . . . . .	25
3.1.9	Critérios de qualidade dos estudos primários . . . . .	25
3.2	<i>Condução da Revisão Sistemática . . . . .</i>	25
3.2.1	Artigos selecionados . . . . .	26
3.2.2	Comparativo dos artigos selecionados . . . . .	27
4	<b>Construção do modelo de programação linear inteira . . . . .</b>	31
4.1	<i>Projeto de Rede Multiproduto de Custo Fixo Capacitado. . . . .</i>	31
4.2	<i>Desenvolvimento do modelo e atribuição de custos . . . . .</i>	32
4.2.1	Abertura da demanda por vértice . . . . .	32
4.2.2	Representação de Localidades . . . . .	33
4.2.3	Atribuição de custos e capacidade logísticas . . . . .	34
4.2.4	Restrição e custos para o Saldo de ICMS . . . . .	35
4.2.5	Crédito Presumido de ICMS . . . . .	38
4.2.6	DIFAL . . . . .	39
4.2.7	ICMS-ST . . . . .	39
4.2.8	Custos de aquisição de produtos . . . . .	40
4.3	<i>Modelo de programação inteira proposto para o problema de Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos com Tributação. . . . .</i>	41
4.3.1	Dados e cálculos de entrada . . . . .	41
4.3.2	Modelo de Programação Inteira . . . . .	44
5	<b>Plano de Trabalho e Cronograma . . . . .</b>	46
5.1	<i>Revisão Bibliográfica . . . . .</i>	46
5.2	<i>Levantamento de Dados . . . . .</i>	46
5.3	<i>Tratamento de Dados . . . . .</i>	46
5.4	<i>Desenvolvimento do modelo proposto . . . . .</i>	47
5.5	<i>Análise de Resultados . . . . .</i>	47

5.6	<i>Avaliação de desempenho</i> . . . . .	47
5.7	<i>Redação da Monografia</i> . . . . .	47
5.8	<i>Defesa da Dissertação</i> . . . . .	47
5.9	<i>Cronograma de Atividades</i> . . . . .	47
	<b>Referências</b> <sup>1</sup> . . . . .	49

---

<sup>1</sup> 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 (2013), 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 (2013), 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 física um PRCS é considerado um problema bem resolvido, porém para o PRCST (Projeto de Rede de Cadeia de suprimentos com Tributação) 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. 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, para assim 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 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.

A segunda métrica é uma avaliação do tipo intrínseca.

### 1.9.1 Avaliação extrínseca

**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.

### 1.9.2 Avaliação intrínseca

**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 O Problema do Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos com Tributação

Este capítulo visa elucidar os conceitos, regras e métodos inerentes a otimização de um Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos com Tributação. 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, e a terceira parte realiza um panorama sobre os principais métodos e métricas utilizados para a otimização de redes e problemas similares.

### 2.1 *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 fonte 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 à quais fluxos são utilizados pelos produtos, de forma que o caminho e a quantidade de produto que percorre 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 custo frete associado à 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 em 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.

### *2.2 O impacto da tributação brasileira no Projeto de Redes de Cadeia de Suprimentos*

Além dos custos de logísticos, os custos tributários possuem grande relevância na escolha da localização de uma instalação e na definição quais caminhos o fluxo de produtos irá percorrer, desde o fornecedor até 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 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 2.2.2, 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”.

#### 2.2.1 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 2.2.2.

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

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

## 2.2.2 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 de pelo consumidor mas atribui a responsabilidade de recolhimento às empresas, ou seja, a empresa paga o imposto para o estado que repassa o valor 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:

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

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 4.2.4, 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.

### 2.2.3 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 diferente 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.

### 2.2.4 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, são eles:

- 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 que abranja os principais benefícios fiscais, que foram citados nos exemplos acima, sendo que a parte do modelo que visa o crédito presumido está descrita na subseção 4.2.5.

### 2.2.5 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 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.

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

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

### 2.2.6 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, o cálculo do DIFAL seria:

- Valor do produto: 100
- Alíquota de ICMS interestadual de A para B: 12%
- Alíquota de ICMS interna de A para A: 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 Revisão Sistemática

#### 3.1 *Protocolo*

##### 3.1.1 Objetivo

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

##### 3.1.2 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 Linear Inteira Mista 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.

##### 3.1.3 Controle

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

##### 3.1.4 Resultados

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

##### 3.1.5 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.

### 3.1.6 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.

### 3.1.7 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/>)

### 3.1.8 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.

### 3.1.9 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)

## 3.2 Condução da Revisão Sistemática

Tabela 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 (echolons)	
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: autor

### 3.2.1 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)

### 3.2.2 Comparativo dos artigos selecionados

Após a seleção é realizada uma comparação entre os artigos, de forma que à 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.

Na tabela 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).

Tabela 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 <sub>2</sub> ; 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: autor

A tabela 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.

Tabela 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: autor

A tabela 4 revela quais foram os resolvidores 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.

Tabela 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

## 4 Construção do modelo de programação linear inteira

À 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 Logística com Custos Tributários, em especial os custos de ICMS. A seção 4.1 apresenta o modelo de Magnanti e Wong (1984) que é utilizado como base para a construção de um novo modelo na seção 4.2, bem como para a aplicação dos custos de uma cadeia de suprimentos com tributação; a seção 4.3 expõe o modelo proposto ao final do capítulo.

### 4.1 Projeto de Rede Multiproduto de Custo Fixo Capacitado.

Como o problema do Projeto de Rede Logística com Custos Tributários 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 citado por 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 dos 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  $y_{ij}^k$  é uma variável contínua, tal que  $y_{ij}^k \in \mathbb{R}^+$ . Ela indica o fluxo que passa pelo arco  $(i, j)$  e é multiplicada por um custo variável  $b_{ij}^k$ .

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  $D(k)$  à partir de seu vértice de origem  $O(k)$ .



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  $j$ . Cada arco  $(i, j)$  possui uma limitação de capacidade  $c_{ij}$ .

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

$$\min \sum_{(i,j) \in A} a_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{s \in S} b_{i,j}^s \cdot y_{ij}^s \quad (2)$$

**Sujeito a**

$$\sum_{i \in N^-(j)} y_{ij}^s - \sum_{k \in N^+(j)} y_{jk}^s = \begin{cases} -d^s & , \text{ se } j \in O(s) \\ d^s & , \text{ se } j \in D(s) \\ 0 & , \text{ para os demais casos} \end{cases}, \forall s \in S, j \in V \quad (3)$$

$$\sum_{s \in S} y_{ij}^s \leq c_{ij} \cdot x_{ij}, \forall (i, j) \in A \quad (4)$$

A equação (3) 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 daquela arco, conforme a inequação (4).

## 4.2 Desenvolvimento do modelo e atribuição de custos

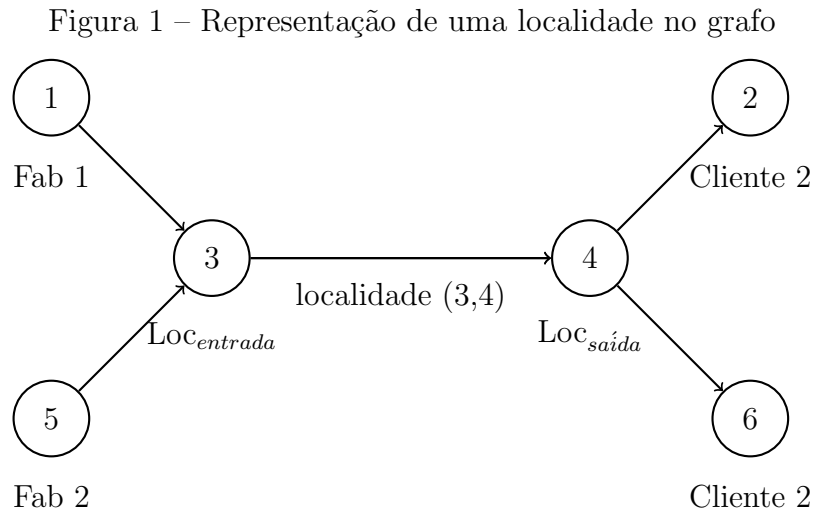
### 4.2.1 Abertura da demanda por vértice

A partir do modelo de Magnanti e Wong (1984) é feita uma alteração na restrição (3), 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 (3) é substituída pela equação (5).

$$\sum_{i \in N^-(j)} y_{ij}^s - \sum_{k \in N^+(j)} y_{jk}^s = \begin{cases} -d_j^s & , \text{ se } j \in O(s) \\ d_j^s & , \text{ se } j \in D(s) \\ 0 & , \text{ para os demais casos} \end{cases} \quad , \forall s \in S, j \in V \quad (5)$$

#### 4.2.2 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 representadas 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 1, 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.



### 4.2.3 Atribuição de custos e capacidade 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 (2), 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 (4), 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 5 – 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

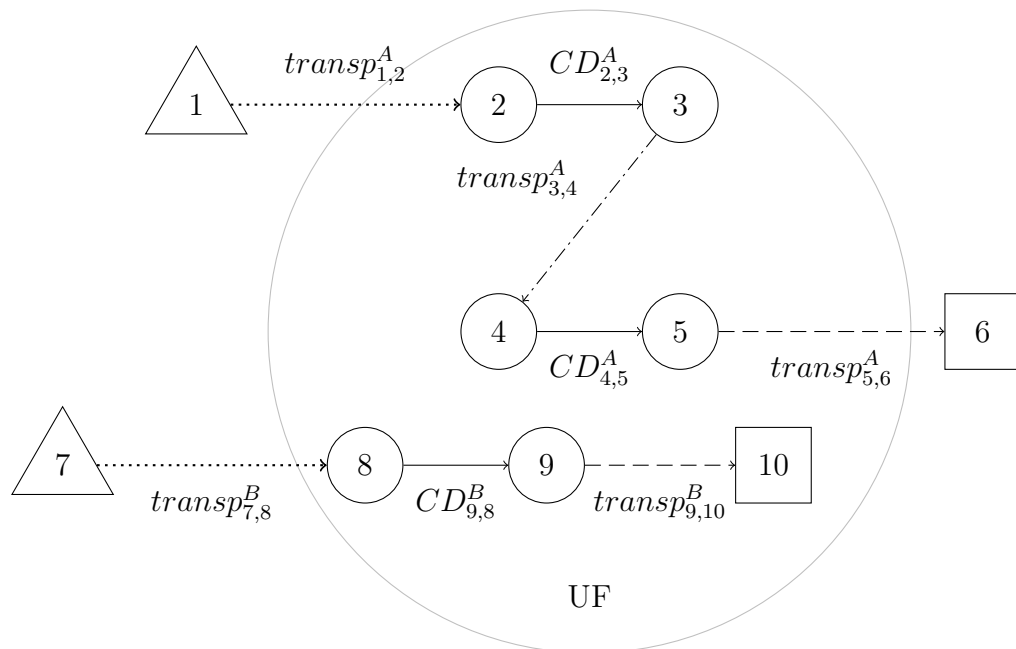
Fonte: autor

No contexto da 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 (2) são descritos como  $a_{ij} = CFL_{ij}$  e  $b_{ij} = CVL_{ij}$ . E as capacidades da restrição (4) ficam definidas como  $c_{ij} = CAP_{ij}$ .

#### 4.2.4 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 2 demonstra como o saldo de ICMS é calculado para uma determinada UF.

Figura 2 – Mecânica de saldo de ICMS considerando dois produtos ( $A, B$ )



Abaixo está a descrição de cada um dos vértices da figura 2, 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, pode-se definir os arcos de crédito através do conjunto  $UF^-(u) = \{ (i, j) \in A \mid i \in V, j \in UF(u), i \notin O(s) \forall s \in S \}$ . Os arcos de débito são definidos através do conjunto  $UF^+(u) = \{ (i, j) \in A \mid i \in UF(u), j \in V, j \notin D(s) \forall s \in S \}$ . Onde  $u$  é uma UF do Brasil, e  $UF(u)$  é o conjunto de todos os vértices que possuem ao menos um vértice contido na UF  $u$ .  $u, \mid u \in U, UF(u) \subset V$ .

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

$$icms(i, j, s) = \frac{VP_{ij}^s}{(1 - ICMSalqt_{ij}^s - PISalqt^s - COFINSalqt^s)} \cdot ICMSalq_{ij}^s \quad (6)$$

, 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 (6),  $icms(i, j, s)$ , se refere à 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

$$\sum_{ij \in UF^+(u)} \sum_{s \in S} icms(i, j, s) \cdot y_{ij}^s - \sum_{ij \in UF^-(u)} \sum_{s \in S} icms(i, j, s) \cdot y_{ij}^s, \forall u \in U \quad (7)$$

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 (7), forma a expressão descrita abaixo.

$$\sum_{ij \in UF^+(u)} \sum_{s \in S} icms(i, j, s) \cdot y_{ij}^s - \sum_{ij \in UF^-(u)} \sum_{s \in S} icms(i, j, s) \cdot y_{ij}^s + ICMSCA_u, \forall u \in U \quad (8)$$

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, é importante que se limite o valor do saldo do ICMS em zero, caso contrário o

resolvedor 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 (9) e adiciona-se o somatório  $\sum_{u \in U} z_u$  à função objetivo (2), obtendo a função objetivo (10).

$$z_u \geq \sum_{ij \in UF^+(u)} \sum_{s \in S} icms_{i,j}^s \cdot y_{ij}^s - \sum_{ij \in UF^-(u)} \sum_{s \in S} icms_{i,j}^s \cdot y_{ij}^s + ICMSCA_u, \forall u \in U \quad (9)$$

$$\min \sum_{(i,j) \in A} a_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{s \in S} b_{i,j}^s \cdot y_{ij}^s + \sum_{u \in U} z_u \quad (10)$$

#### 4.2.5 Crédito Presumido de ICMS

Como descrito na subseção 2.2.3, 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 4.2.4, 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 (8) conforme a inequação abaixo:

$$z_u \geq \sum_{ij \in UF^+(u)} \sum_{s \in S} m_{i,j}^s \cdot y_{ij}^s - \sum_{ij \in UF^-(u)} \sum_{s \in S} n_{i,j}^s \cdot y_{ij}^s - p_u, \forall u \in U \quad (11)$$

Onde:

$$\begin{aligned} m_{i,j}^s &= icms(i, j, s) - CredPres_{i,j,s} \\ n_{i,j}^s &= icms(i, j, s) \cdot (1 - ICMS[\%]anulacao_j^s) \\ p_u &= ICMSCA_u \end{aligned}$$

#### 4.2.6 DIFAL

Conforme descrito na seção 2.2.6, 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 (11):

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

Onde:

$$difal(i, j, s) = icms(j, j, s) - icms(i, j, s) \quad (12)$$

A definição da função  $icms(i, j, s)$  é dada em (6), na subseção 4.2.4.

#### 4.2.7 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 (11), sendo incluído diretamente na função objetivo. Assim, adiciona-se o custo do ICMS-ST à constante  $b_{ij}^s$  da função objetivo (2), 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.



$$icmsST(i, j, s) = \begin{cases} (icmsbc(i, j, s) + ipi(i, j, s)) \\ \cdot (1 + MVA_{ij}^s) \cdot ICMSalqt_{ij}^s & , \text{ se há ICMS-ST} \\ -icms(i, j, s) \\ 0 & , \text{ se não há ICMS-ST} \end{cases} \quad (13)$$

$$icmsbc(i, j, s) = \frac{VP_{ij}^s}{(1 - ICMSalqt_{ij}^s - PISalqt^s - COFINSalqt^s)} \quad (14)$$

$$ipi(i, j, s) = icmsbc(i, j, s) \cdot IPIalqt^s \quad (15)$$

A função para o cálculo do ICMS-ST (13) é composta pela base de cálculo do ICMS (14), o custo do IPI (15), 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 (6).

A base de cálculo do ICMS é definida na função (14) 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 (15) é o custo do IPI, que é calculado multiplicando-se a base de cálculo do ICMS com a alíquota do IPI.

#### 4.2.8 Custos de aquisição de produtos

Os custo 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, defini-se as rotas onde há aquisição de produto como  $AF = \{ (i, j) \mid (i, j) \in A, (i, j) \text{ é uma rota de aquisição} \}$ . 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 (6).

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

$$custoAquisicao(i, j, s) = \begin{cases} VP_{ij}^s + icms(i, j, s) & , \text{ se } (i, j) \in AF \\ 0 & , \text{ se } (i, j) \notin AF \end{cases} \quad (16)$$

#### 4.3 Modelo de programação inteira proposto para o problema de Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos com Tributação.

Nesta seção é proposto um modelo de programação inteira para o problema de Projeto de Rede de Cadeia de Suprimentos com Tributação. A seção 4.3.1 define os dados e cálculos que serão usados no modelo e consolida os custos em um número menor de contantes, enquanto que a seção 4.3.2 define o modelo proposto.

##### 4.3.1 Dados e cálculos de entrada

Nesta seção são apresentados os dados de entrada e seus respectivos cálculos. Os cálculos são demonstrados, para facilitar a compreensão, através de funções que recebem índices como entrada e retornam uma constante.

Dados para construção do grafo

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 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 cobrada para a 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  $s$ .

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

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

$$icmsST(i, j, s) = \begin{cases} (icmsbc(i, j, s) + ipi(i, j, s)) \\ \cdot (1 + MVA_{ijs}^s) \cdot ICMSalqt_{ij}^s & , \text{ se há ICMS-ST} \\ -icms(i, j, s) \\ 0 & , \text{ se não há ICMS-ST} \end{cases} \quad (17)$$

#### 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 em (6).

$$custoAquisicao(i, j, s) = \begin{cases} VP_{i,j}^s + icms(i, j, s) & , \text{ se } (i, j) \in AF \\ 0 & , \text{ se } (i, j) \notin AF \end{cases} \quad (18)$$

Custos Consolidados para F.O.

$$\begin{aligned}
 a_{i,j} &= CFL_{ij} \\
 b_{i,j}^s &= CVL_{ij} + icmsST(i, j, s) + custosFornecimento(i, j, s) \\
 c_{i,j} &= c_{ij} \\
 m_{i,j}^s &= icms(i, j, s) - CredPres(i, j, s) + difal(i, j, s) \\
 n_{i,j}^s &= icms(i, j, s) \cdot (1 - ICMS[\%]anulacao_j^s) \\
 p_u &= ICMSCA_u
 \end{aligned}$$

#### 4.3.2 Modelo de Programação Inteira

$x_{ij}$ : variável 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:**

$$\min \sum_{(i,j) \in A} a_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{s \in S} b_{i,j}^s \cdot y_{ij}^s + \sum_{u \in U} z_u \quad (19)$$

**Sujeito a:**

$$\sum_{i \in N^+(j)} y_{ji}^s - \sum_{i \in N^-(j)} y_{ij}^s = \begin{cases} -o_j^s & , \text{ se } j \in O(s) \\ d_j^s & , \text{ se } j \in D(s) \\ 0 & , \text{ para os demais casos} \end{cases}, \forall j \in V, s \in S \quad (20)$$

$$\sum_{s \in S} y_{ij}^s \leq c_{ij} \cdot x_{ij}, \forall (i, j) \in A \quad (21)$$

$$z_u \geq \sum_{ij \in UF^-(u)} \sum_{s \in S} m_{i,j}^s \cdot y_{ij}^s - \sum_{ij \in UF^+(u)} \sum_{s \in S} n_{i,j}^s \cdot y_{ij}^s - p_u, \forall u \in U \quad (22)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (23)$$

$$y_{ij}^s \in \mathbb{R}, y_{ij}^s > 0 \quad (24)$$

$$z_u \in \mathbb{R}, z_u > 0 \quad (25)$$

A inequação (20) 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 (21) garante que os fluxos respeitem as capacidades dos arcos, e proíbem que exista fluxo em algum arco não atribuído pelo desenho da rede.

A inequação (22) 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 Plano de Trabalho e Cronograma

Este capítulo descreve o plano de trabalho e cronograma das atividades a serem desenvolvidas até a data da defesa dissertação, à partir da data de qualificação.

### 5.1 *Revisão Bibliográfica*

Consiste no desenvolvimento contínuo da dissertação durante as demais atividades propostas, com o objetivo de incrementar e melhorar o texto proposto.

### 5.2 *Levantamento de Dados*

Durante esta fase serão utilizados dados de vendas de uma empresa do setor de cosméticos. Estes dados servirão de base para a definição das demandas em cada ponto de vendas, bem como para a pesquisa dos dados tributários, onde cada produto, através de seu NCM (Nomenclatura Comum do Mercosul) e da UFs de origem e de destino, pode possuir uma alíquota ou mecânica tributária específica. Outras bases sintéticas poderão ser utilizadas com o objetivo de avaliar o tempo de execução do modelo proposto e suas potenciais limitações. Estas bases poderão ser tanto derivações dos dados reais coletados como também bases puramente sintéticas, exemplos de variações seriam: alteração do número de localidades; o uso de diferentes limitantes superiores nas restrições de capacidade conforme a inequação (21); alteração da quantidade de produtos; alteração na quantidade de pontos de demanda.

### 5.3 *Tratamento de Dados*

Depois de recolhidos, os dados serão manipulados para que estejam de acordo com o modelo proposto na forma de uma entrada com formato pré-definido. Nesta fase do projeto podem ser encontrados dados faltantes, incorretos ou fora da curva; casos como estes serão tratados e corrigidos durante esta etapa do projeto.

#### *5.4 Desenvolvimento do modelo proposto*

O modelo proposto é construído através de uma representação matemática do problema estudado através de um modelo de programação inteira mista. Este modelo será desenvolvido em uma linguagem de programação ainda a ser definida em conjunto com o resolvidor comercial IBM ILOG® CPLEX®, para a resolução do modelo.

#### *5.5 Análise de Resultados*

Com o objetivo de estimar o ganho potencial com a implementação do novo projeto de rede, a análise de resultados será realizada de forma quantitativa através da comparação entre o projeto de rede do cenário base e o projeto de rede proposto.

#### *5.6 Avaliação de desempenho*

Nesta fase serão mensurados os tempos de execução de cada fase do modelo, desde a montagem da estrutura do problema, passando pelos tempos de resolução no resolvidor, até os tempos de tratamento dos dados para a saída.

#### *5.7 Redação da Monografia*

A redação da monografia será realizada durante todo o projeto, sendo atualizada conforme a realização de cada fase.

#### *5.8 Defesa da Dissertação*

Apresentação do trabalho de mestrado para comissão examinadora.

#### *5.9 Cronograma de Atividades*



Tabela 6 – Cronograma de atividades proposta para o projeto de pesquisa.

Atividade		2021					
Seq	Descrição	7	8	9	10	11	12
1	Levantamento do dados	X	X	X			
2	Tratamento do dados	X	X	X			
3	Desenvolvimento do modelo proposto	X	X	X	X		
4	Avaliação de desempenho		X	X	X		
5	Análise de sensibilidade				X	X	
6	Análise de resultados				X	X	
7	Redação da monografia	X	X	X	X	X	X
8	Defesa da dissertação						X

Fonte: autor

## Referências<sup>1</sup>

- 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 27.
- CHOPRA, S.; MEINDL, P. *Gestão da Cadeia de Suprimentos: estratégia, planejamento e operações*. 4<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Pearson Education do Brasil, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- 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](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5087-7_1). Citado na página 32.
- 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](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 27.
- HARAHAP, A.; MAWENGKANG, H.; EFENDI, S. *et al.* An integer programming model for multi-echelon supply chain decision problem considering inventories. *MSE*, v. 300, n. 1, p. 012026, 2018. Citado na página 27.
- 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 27.
- 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 27.
- 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 12 e 27.
- LEAL, J. E. *Modelagem integrada para otimização da cadeia logística de combustíveis no Brasil*. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2018. Citado na página 27.
- 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 31, 32 e 33.

<sup>1</sup> De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

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 27.

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 27.

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 27.

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 27.

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 27.

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 27.

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 12.