

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES E LOGÍSTICA

PEDRO IDERALDO SAMPAIO JÚNIOR

**MODELO DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA PARA ESCOLHA MODAL DE
TRANSPORTE EM ENVIO DE CARGAS**

Joinville

2023

PEDRO IDERALDO SAMPAIO JÚNIOR

**MODELO DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA PARA ESCOLHA MODAL DE
TRANSPORTE EM ENVIO DE CARGAS**

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia de Transportes e Logística do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Silvia Lopes de Sena Tagliarenha

Joinville

2023

PEDRO IDERALDO SAMPAIO JÚNIOR

MODELO DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA PARA ESCOLHA MODAL DE
TRANSPORTE EM ENVIO DE CARGAS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Transportes e Logística, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 27 de junho de 2023.

Banca Examinadora:

Dra. Silvia Lopes de Sena Taglialha
Orientadora/Presidente

Dra. Christiane Wenck Nogueira Fernandes
1º Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Romulo Alberto Castillo Cardenas
2º Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a todos que estiveram comigo durante essa jornada.

Cada aprendizado foi essencial para chegar aqui.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a minha família, que sempre acreditou em mim e me deu energias para continuar lutando. Ao meu pai, meu grande entusiasta, sempre me deu todo o suporte para que pudesse cursar esta grande universidade que é a UFSC. Às minhas irmãs que me acompanham sempre, me incentivando nos desafios e me dando suporte nas horas difíceis. E principalmente à minha mãe, uma pessoa indescritível que, para não exagerar aqui, vou definir como A melhor pessoa do mundo. Infelizmente ela não pode estar aqui para presenciar este momento, mas com certeza estará vendo lá do céu.

Agradecer imensamente a minha namorada Vitória, a pessoa que acompanhou de perto todos os momentos do desenvolvimento deste estudo, me dando total suporte em todas as situações possíveis. Você foi incrível!

Um grande obrigado também a todos meus amigos, que, graças a Deus, são muitos. Porém, lembrem-se que levo todos vocês no meu coração para toda a vida, cada um que esteve do meu lado em diversos momentos, oferecendo conversas e trocas que pareciam simples, mas o valor criado dentro de mim é imenso. Um abraço especial a Família ZIKA, amigas verdadeiras que levarei eternamente.

Obrigado a minha orientadora, professora Sílvia, que esteve comigo em diversos momentos durante minha graduação. Sem ela com certeza eu não teria me desenvolvido tanto. Aproveito para estender o agradecimento a professora Christiane, suas aulas de Pesquisa Operacional I tiveram grande influência no meu interesse pela área logística, muito obrigado!

RESUMO

Com o crescimento das populações e o distanciamento entre os centros produtivos e consumidores, o transporte de cargas se tornou uma atividade muito importante para as companhias, representando uma fatia significativa de seus custos de operação. A gestão de fretes se tornou ponto chave para a competitividade entre mercados, obrigando as empresas a buscar novas soluções para se diferenciarem frente seus concorrentes. Este trabalho propõe uma metodologia para escolha modal em cinco cenários de distribuição de produtos de uma empresa do ramo de construção civil para suas unidades do Brasil. O presente estudo elabora um modelo de programação dinâmica para escolha modal no envio de cargas utilizando sincromodalidade. O modelo possibilitou identificar a rota com menor custo para envio, nos cinco cenários apresentados, e indicou a multimodalidade entre modal rodoviário e aquaviário, como mais indicada para envios com distâncias acima de mil quilômetros.

Palavras-chave: Transporte de cargas. Programação dinâmica. Sincromodalidade.

ABSTRACT

Considering the growth of populations and the distance between productive centers and consumers, freight transportation has become a highly important activity for companies, representing a significant portion of their operating costs. Freight management has become a key factor for competitiveness among markets, forcing companies to seek new solutions to differentiate themselves from their competitors. This paper proposes a methodology for modal choice in five scenarios of product distribution for a construction company to its units in Brazil. The present study develops a dynamic programming model for modal choice in cargo transportation using synchromodality. The model allowed for the identification of the route with the lowest cost for shipment in the five presented scenarios and indicated multimodality between road and maritime transportation as the most suitable for shipments over a thousand kilometers.

Keywords: Freight transportation. Dynamic programming. Synchromodality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de um estágio do problema.....	29
Figura 2 - Ilustração para modelo de PD com estágios de decisão em série.....	30
Figura 3 - Representação em forma de diagrama.....	31
Figura 4 - Representação gráfica do Problema de Caminhos Mínimos	32
Figura 5 - Modelo geral de PD	33
Figura 6 - Unidades da Empresa X consideradas no estudo	36
Figura 7 - Etapas de solução.....	37
Figura 8 - Modelo de PD determinística para envio de cargas com T estágios	39
Figura 9 - Representação do Problema de Envio de Cargas no Estágio t	40
Figura 10 - Modelo determinístico de PD	41
Figura 11 - Passos considerados para a aplicação da PDD.	43
Figura 12 - Rota ótima para o cenário 1	47
Figura 13 - Rota ótima para o cenário 2	49
Figura 14 - Rota ótima para o cenário 3	51
Figura 15 - Rota ótima para o cenário 4.....	53
Figura 16 - Rota ótima para o cenário 5	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Modelo de PDD para o envio de cargas utilizando sincromodalidade.	42
Quadro 2 - Modelo PDD para o Cenário 1	46
Quadro 3 - Modelo PDD para o Cenário 2	48
Quadro 4 - Modelo PDD para o Cenário 3	50
Quadro 5 - Modelo PDD para o Cenário 4	52
Quadro 6 - Modelo PDD para o Cenário 5	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNT – Confederação Nacional dos Transportes
PIB – Produto Interno Bruto
Ilos – Instituto de Logística e Supply Chain
OTM – Operador de Transporte Multimodal
PO – Pesquisa Operacional
PD – Programação Dinâmica
PDD – Programação Dinâmica Determinística
R – Rodoviário
F – Ferroviário
C – Cabotagem
CA – Cabo de Santo Agostinho
JO – Joinville
TA – Tatuí
SA – Santos
JU – Jundiaí
IB – Ibité
RJ – Rio de Janeiro
RC – Rio Claro
VI – Vitória
FS – Feira de Santana
IT – Itajaí
SJ – São José dos Pinhais
SO – Sorocaba
JA – Jaraguá do Sul
ES – Escada
CO – Contagem
SE – Serra
GA – Guarapari
VR – Volta Redonda
CP – Campinas
BT – Betim
PA – Pouso Alegre

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. OBJETIVOS	14
1.1.1. Objetivo Geral	14
1.1.2. Objetivos Específicos.....	14
1.2. METODOLOGIA.....	15
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1. LOGÍSTICA	17
2.2. TRANSPORTES	18
2.2.1. Transporte de cargas.....	19
<u>2.2.1.1. Transporte Unimodal/Dedicado</u>	<u>20</u>
2.2.1.1.1. Transporte Rodoviário	20
2.2.1.1.2. Transporte Ferroviário	21
2.2.1.1.3. Transporte Aquaviário	22
2.2.1.1.4. Transporte Aéreo.....	22
2.2.1.1.5. Transporte Dutoviário.....	23
<u>2.2.1.2. Transporte Intermodal</u>	<u>23</u>
<u>2.2.1.3. Transporte Multimodal</u>	<u>24</u>
<u>2.2.1.4. Transporte Sincromodal</u>	<u>25</u>
2.3. PESQUISA OPERACIONAL.....	26
2.3.1. Programação dinâmica	27
<u>2.3.1.1. Programação dinâmica determinística.....</u>	<u>30</u>
<u>2.3.1.2. Problema de Caminhos Mínimos</u>	<u>31</u>
2.4. APLICAÇÕES DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA.....	33
3. ESTUDO DE CASO	35
3.1. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA	35
3.2. PROBLEMÁTICA E ESCOPO DO TRABALHO.....	35
3.3. ETAPAS DO MÉTODO DE SOLUÇÃO	37
3.4. PREMISSAS E TRATAMENTO DOS DADOS.....	37
3.5. MODELO DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA DETERMINÍSTICA PARA O ENVIO DE CARGAS UTILIZANDO SINCROMODALIDADE.....	39

3.5.1	Modelo de programação dinâmica em planilha para o problema de envio de cargas utilizando sincromodalidade.....	42
3.5.2.	Modelo de lógica para resolução do problema de envio de cargas utilizando sincromodalidade através da programação dinâmica determinística	43
4.	RESULTADOS	44
4.1.	CENÁRIOS PROPOSTOS PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO	44
4.2.	RESULTADOS OBTIDOS POR CENÁRIO PROPOSTO.....	45
4.2.1.	Cenário 1 – Rota Joinville (SC) - Escada (PE).....	45
4.2.2.	Cenário 2 – Rota Rio Claro (SP) - Serra (ES).....	47
4.2.3.	Cenário 3 – Rota Joinville (SC) - Rio Claro (SP)	49
4.2.4.	Cenário 4 – Rota Rio Claro (SP) - Contagem (MG).....	51
4.2.5	Cenário 5 – Rota Rio Claro (SP) - Escada (PE).....	53
4.3.	DISCUSSÕES	55
5.	CONCLUSÃO.....	57
	REFERÊNCIAS	59

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento do mercado global, as indústrias tendem a um aumento da necessidade de aprimoramento das operações logísticas. A partir de algumas vantagens como custos operacionais, custos de implantação e incentivos fiscais, as indústrias concentram suas operações em locais distantes dos centros de consumo. Os chamados Centros Operacionais fazem que a companhia dependa diretamente das operações logísticas de distribuição, tanto para envio de seus materiais aos clientes, quanto para recebimento de suas matérias-primas. Uma vez que o produto só tem valor quando chega ao cliente, a necessidade de distribuição se eleva à medida em que os mercados crescem (BALLOU, 2006).

Segundo relatório divulgado pela Confederação Nacional dos Transportes (CNT), o custo logístico corresponde a 12,7% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil, o que é consideravelmente alto se comparado aos 7,8% atribuídos aos Estados Unidos. Esses custos podem ser segmentados em quatro categorias principais: transporte, estoque, armazenagem e custos administrativos. O transporte representa 50% desses custos, seguido por estoque com 36% de representatividade, armazenagem com 7% e custos administrativos com 3% (ATUAL, 2016). Esses dados destacam a importância de otimizar os processos logísticos e reduzir os custos associados, para dessa forma impulsionar a competitividade.

Além das questões relacionadas aos custos, o transporte destaca-se como o aspecto mais importante nas operações logísticas, devido à sua relevância para o abastecimento da cadeia de suprimentos (NOVAES, 2007). A matriz de utilização dos modais de transporte de cargas no Brasil é composta por 65% de transporte rodoviário, 20% ferroviário, 12% aquaviário, 3% dutoviário e 0,1% aéreo, o que reflete uma grande dependência do modal rodoviário no país (ATUAL, 2016).

O Brasil é um país de dimensões continentais, tendo distância de 4394 quilômetros de norte a sul e 4319 quilômetros de leste a oeste. Os transportes de longas distâncias podem ser beneficiados a partir da boa utilização da matriz de transportes, podendo ser aproveitados os diferenciais de cada modal, como tempo, custo e até níveis de poluição devido à emissão de gases poluentes.

Países como Holanda e Bélgica se destacam com estudos para aprimorar o nível da utilização dos transportes, unindo toda a matriz de transportes afim de reduzir os custos dos serviços e os prazos de entrega. Segundo Lavallo (2017), o Instituto Holandês de Logística Avançada propõe um novo modo de transporte chamado sincromodalidade, no qual o modal de transporte utilizado de um ponto a outro pode ser escolhido em tempo real, com base nas necessidades de entrega do responsável pela carga.

A medida em que aumentam os níveis de detalhamento dos processos das companhias, aumenta também a complexidade das soluções, com isso desenvolveu-se a Pesquisa Operacional, que é apresentada como ferramenta de auxílio à tomada de decisão em casos como o descrito anteriormente (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). Essa ferramenta é capaz de modelar os processos e compor esquemas matemáticos para avaliar impactos nas atividades a partir de alterações pré-definidas conforme necessidade ou desejo dos interessados.

Durante a pesquisa será dada ênfase aos envios de carga multimodais, trazendo o tema de sincromodalidade para o contexto brasileiro. Nos capítulos seguintes, tem-se a abordagem da Pesquisa Operacional aplicada à logística e uma proposição de modelo de programação dinâmica determinística para avaliar os envios de cargas utilizando um ou mais modais através do envio sincromodal.

1.1. OBJETIVOS

Para resolver a problemática do envio de cargas multimodal utilizando a sincromodalidade no contexto brasileiro, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é aplicar um método de programação dinâmica determinística para identificar a melhor combinação de escolha de modais de transporte para o envio de cargas em cinco cenários de envio de uma empresa do ramo de construção civil com sede na cidade de Joinville, Santa Catarina.

1.1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Definir possibilidades de rota e modais disponíveis em cinco cenários de envio de cargas;
- Aplicar o método de menor caminho utilizando Programação Dinâmica Determinística para o caso de envio de cargas em cinco cenários de envio de uma empresa de Santa Catarina;
- Minimizar o custo de envio em cada rota utilizando Programação Dinâmica Determinística.

1.2. METODOLOGIA

A utilização de métodos científicos na elaboração de trabalhos acadêmicos se baseia no formato ou no caminho percorrido para o alcance do conhecimento desejado, podendo se resumir em um conjunto de procedimentos adotados os quais levam a uma resposta sobre determinado assunto (PRODANOV; FREITAS, 2013). A metodologia científica se refere à forma em que o problema é estruturado e conduzido a sua solução.

A escolha da metodologia a ser utilizada em um determinado problema está ligada às suas características. Segundo Prodanov e Freitas (2013), a definição do método depende de fatores como a natureza do objeto estudado, os recursos materiais disponíveis, o nível de abrangência desejado e, principalmente, da inspiração do pesquisador.

Neste trabalho a metodologia escolhida para o alcance dos objetivos foi o estudo de caso. De acordo com Prodanov e Freitas (2013) o estudo de caso consiste na coleta e análise de informação sobre determinado assunto, a fim de estudar seus aspectos variados, que vão ao encontro do assunto da pesquisa.

No que diz respeito à natureza desta pesquisa, podemos considerá-la como uma pesquisa aplicada, pois, busca gerar conhecimentos para aplicação prática na solução de problemas específicos.

Já do ponto de vista dos objetivos do trabalho, este se classifica como uma pesquisa explicativa, a qual visa identificar fatores que influenciam no fenômeno e quais destes são fatores dominantes ou não, utilizando um método experimental que possibilita a manipulação e controle das variáveis para assim entender a consequência de suas alterações para o sistema.

Conforme apontado previamente, o presente trabalho utilizou da metodologia de estudo de caso para seu desenvolvimento, dividindo, para isso, o estudo em 5 partes, de acordo com o descrito durante a seção a seguir.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Durante o presente estudo será abordado o tema de envio de cargas utilizando sincromodalidade, o que se dará através de cinco seções nas quais serão apresentados os temas relevantes para o assunto, sua forma de resolução, seus resultados e conclusões.

O primeiro capítulo da pesquisa é construído a partir da definição do problema, o qual foi encontrado conforme a necessidade de uma empresa do ramo de construção civil situada no município de Joinville, Santa Catarina, a partir da necessidade de abastecimento dos estoques entre seus centros. Nesta etapa apresenta-se o tema e se definem os objetivos, a fim de embasar e introduzir a relevância do estudo.

Já no segundo capítulo do desenvolvimento, temos a fundamentação teórica, onde busca-se referências para respaldo teórico das questões e assuntos abordados durante o trabalho. São apresentadas questões como logística e pesquisa operacional, entre outras, necessárias para o completo entendimento da aplicação proposta, buscando credibilizar a pesquisa e seus resultados para que possam oferecer confiabilidade aos seus leitores.

O capítulo três consiste na coleta de dados e informações a serem utilizados nos métodos, estes dados foram obtidos por meio de pesquisas com empresas que atuam no ramo de fretes e prestam serviços à Empresa X. Desde a problemática do trabalho até o modelo desenvolvido, este capítulo apresenta também as premissas utilizadas e a lógica aplicada.

No quarto capítulo tem-se a aplicação dos métodos para os casos escolhidos, com abordagem de técnicas e obtenção de resultados para os casos pretendidos, buscando dessa forma o suporte necessário para a proposição de soluções para o caso desejado. A partir da apresentação dos cenários, são discutidos pontos importantes para cada aplicação, que influenciaram o resultado do modelo de alguma forma, e quais possibilidades foram encontradas para as diferentes alternativas.

O capítulo cinco finaliza o trabalho ao apresentar conclusões sobre a aplicação e o desenvolvimento. Com uma visão crítica sobre o tema, esta seção apresenta pontos que devem ser considerados para futuros estudos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A finalidade deste capítulo é apresentar os temas relevantes para o entendimento dos assuntos relacionados ao estudo aqui apresentado. Ressaltando questões sobre transportes, pesquisa operacional e suas aplicações aqui abordadas.

2.1. LOGÍSTICA

Segundo Christopher (2011), logística é a gestão, movimentação e controle dos estoques, além da sua aquisição, e tem como objetivo maximizar a lucratividade das operações visando o melhor custo-benefício. As operações logísticas consistem em ações desde a aquisição dos insumos para a produção do material, toda sua movimentação enquanto de posse da empresa, até a entrega ao cliente no local acordado.

O crescimento dos sistemas logísticos possibilitou o distanciamento geográfico entre os centros consumidores e os centros produtivos, a medida em que se disponibilizavam redes de envio, as regiões se especializavam nos bens que possuíssem melhores condições para produção (BALLOU, 2006). Com o crescimento das sociedades e, por consequência, do consumo de materiais e alimentos longe dos centros de produção, teve-se o desenvolvimento das redes logísticas, uma vez que os bens só teriam valor quando disponíveis para as populações.

Por muitos anos, durante o desenvolvimento das empresas, as atividades logísticas foram vistas como atividades secundárias que não agregavam valor aos produtos, sendo colocadas como processos de apoio à fabricação. De acordo com Novaes (2007), grande parte das companhias surgiram no chão de fábrica, tendo foco apenas nos processos de produção e com visão dos processos logísticos como atividades reativas e não proativas.

Com isso, Christopher (2011) destaca a logística como oportunidade de vantagem competitiva, possibilitando às empresas, destacarem-se perante suas concorrentes pela percepção dos clientes, e, além disso, trazerem benefícios aos custos das operações. Ballou (2006) destaca também que o planejamento e o controle das atividades logísticas geram um

potencial de diferenciação considerável do nível de serviço praticado pelas companhias se comparado ao simples gerenciamento destas atividades.

A evolução da logística transformou esta em uma disciplina altamente perceptível para a gestão da cadeia de suprimentos das empresas, uma vez que traz sua particular importância ao atendimento das necessidades dos clientes e à agregação de valor aos produtos (SIMCHI-LEVI; KAMINSKY; SIMCHI-LEVI, 2010). A disponibilidade de produtos e a velocidade em que são colocados à disposição dos clientes se tornou um diferencial das companhias, para que, com a devida gestão dos estoques e movimentações, possa atender seus clientes com melhor disponibilidade e custos aceitáveis ao processo.

De acordo com Ballou (2006), o transporte figura como elemento principal das atividades logísticas das empresas, uma vez que representa cerca de um terço de seus custos totais. No capítulo seguinte serão abordados os principais temas relacionados aos transportes e como se deu seu desenvolvimento.

2.2. TRANSPORTES

Transporte é definido como o ato de levar um material de um ponto a outro, e teve sua origem nos primórdios da humanidade, inicialmente se limitando à capacidade de carregamento de um ser humano, depois disso utilizou-se também dos animais para esta atividade e, em seguida, teve seu grande crescimento junto ao advento da roda. O comércio alcançou seu grande desenvolvimento junto do aprimoramento dos transportes e suas infraestruturas, quando se pode levar os materiais para centros consumidores cada vez mais distantes (RODRIGUES, 2007).

De acordo com Chopra e Meindl (2011), o deslocamento de materiais se tornou um processo muito importante na cadeia de suprimentos das empresas, causando forte impacto em sua eficiência e na capacidade de reação frente às mudanças do mercado. A velocidade do transporte impacta diretamente na responsividade do negócio, porém, pode afetar também sua eficiência, visto que em grande parte das situações, transportes mais ágeis possuem menor capacidade de carga.

O tipo de transporte utilizado muitas vezes pode interferir diretamente em fatores como níveis de estoque e também na localização das instalações do negócio, uma vez que será necessária a aquisição de insumos e o escoamento dos produtos até os clientes ou postos de venda (CHOPRA; MEINDL, 2011). Segundo Ballou (2006), a eficiência dos sistemas de

transporte traz benefícios para a competitividade do mercado, para o aumento das economias de escala na produção e, por conseguinte, para a redução geral dos preços dos produtos.

Os sistemas de transporte são compostos por modo, forma e meio de transporte, além das instalações complementares, que são respectivamente: as vias em que se deslocam, o relacionamento entre elas, a unidade transportadora e, por fim, os terminais de carga (RODRIGUES, 2007). Nas subseções seguintes serão abordadas questões sobre o transporte de cargas e sua importância para os sistemas logísticos das companhias.

2.2.1. Transporte de cargas

Os sistemas de transporte de cargas estão diretamente ligados ao desenvolvimento econômico das regiões, uma vez que, limitados os meios de distribuição, o consumo se limita aos bens produzidos em regiões geograficamente próximas. Já um sistema bem desenvolvido, segundo Ballou (2006), traz competitividade ao mercado e incentiva a produção em larga escala, o que conseqüentemente gera uma redução no preço final para os consumidores.

Os autores Caixeta-Filho e Martins (2014) destacam que melhorias no transporte e melhorias nas indústrias estimulam progressos um ao outro, visto que, com o aumento das infraestruturas de transporte os setores produtivos abrangem novos mercados, podendo assim aumentar a utilização de suas fábricas, com melhor aproveitamento da sua capacidade produtiva. Tudo isso gera maior rentabilidade às empresas, que dessa forma podem ter maior alocação de recursos para investimentos, gerando mais empregos e trazendo mais riqueza às regiões onde estão instaladas.

Os transportes com preços acessíveis e de qualidade geram concorrência entre mercados, uma vez que o valor da produção do material em outro local somado ao valor de transporte não ultrapasse o valor de produção na região consumidora, estes se tornam concorrentes e trazem benefícios às populações (BALLOU, 2006). O que faz com que os consumidores deixem de ser reféns de apenas um local produtor e recebem oferta de produtos de qualidade a preços acessíveis e, com maior disponibilidade. Nas seções seguintes serão discutidos os tipos de transporte existentes e os principais pontos que destacam suas funcionalidades.

2.2.1.1. Transporte Unimodal/Dedicado

O transporte unimodal é considerado a forma mais simples de envio de carga, na qual o material é enviado diretamente de um ponto a outro com a utilização de um único veículo e uma única modalidade de transporte, sendo estes regidos por apenas um contrato de transporte (RODRIGUES, 2007). Para que um único modal possa atender às necessidades de envio de uma empresa, este deve se adaptar às operações de carga e descarga e possuir infraestrutura da origem até o destino desejado.

Segundo Caixeta-Filho e Martins (2014), a uni modalidade se deu principalmente na origem dos transportes, quando diferentes modos eram vistos como concorrentes e excludentes entre si e suas iterações eram praticamente nulas. As implantações de infraestrutura de transporte foram realizadas, no início de seu desenvolvimento, focadas em atender as necessidades de escoamento que surgiam das grandes companhias sem se preocupar com a integração entre os modais da rede como um todo.

Junto com seu desenvolvimento surgiram os estudos sobre transporte de cargas, em busca de atender as complexas necessidades geradas pelas transações comerciais entre centros produtores e consumidores (RODRIGUES, 2007). Nas subseções seguintes serão apresentados os modais de transporte existentes, suas origens e principais características.

2.2.1.1.1. *Transporte Rodoviário*

Considerado como um dos mais simples e eficientes, o transporte rodoviário traz como única exigência para sua circulação a existência de rodovias, porém, principalmente para grandes percursos, o modal apresenta um elevado consumo de energia (RODRIGUES, 2007). De acordo com Caixeta-Filho e Martins (2014), o transporte rodoviário teve seu grande desenvolvimento devido a aspectos como transporte de baixa escada, pouca intervenção governamental e fretes definidos com base nos custos.

A possibilidade do serviço porta a porta proporcionada pelo transporte rodoviário também é considerada um grande diferencial para o modal. Uma vez que não é necessário o transbordo da carga, o transporte ganha agilidade por considerar o tempo do percurso apenas o tempo de trânsito entre origem e destino. Segundo Ballou (2006), as vantagens deste transporte se baseiam principalmente no serviço porta a porta, na frequência oferecida, na velocidade e comodidade proporcionadas.

Já para Rodrigues (2007), o desenvolvimento do transporte rodoviário se deu principalmente pelo menor custo de implantação de suas infraestruturas e a maior facilidade de acesso a quase todas as regiões, tudo isso se comparado ao seu maior concorrente da época, o modal ferroviário. Por ser uma implantação mais rápida e que permite acessos a regiões de difícil acesso devido ao relevo, os países optaram pelo desenvolvimento das rodovias, principalmente, para implantação de suas malhas logísticas internas.

Em contrapartida, o autor Dias (2012) destaca como desvantagens para o modal rodoviário a deficiência de muitas rodovias, que causam uma série de fatores negativos como baixa produtividade, baixa velocidade média, elevado consumo de combustível, desgaste acelerado da frota, entre outros. Porém, devido aos pontos positivos citados anteriormente, como possibilidades de acesso e baixo custo de implantação, o modal rodoviário ainda se destaca como melhor opção em muitos casos de necessidade de distribuição de cargas.

2.2.1.1.2. *Transporte Ferroviário*

O transporte ferroviário teve seu maior desenvolvimento durante o século XIX e foi o principal modal responsável pelo grande desenvolvimento econômico das nações nessa época. Segundo Caixeta-Filho e Martins (2014), as principais características para o desenvolvimento do modal foram a grande capacidade de movimentação, a velocidade e a segurança trazidas pelo transporte nas ferrovias.

O maior destaque ao modal se deu graças a sua elevada capacidade de movimentar grandes quantidades de materiais, com um custo de operação baixo e alta confiabilidade. De acordo com Rodrigues (2007), a distância a ser percorrida e a densidade do tráfego são fatores que viabilizam a implantação de ferrovias e, devido aos altos custos de implantação da infraestrutura, o modal se caracteriza como eficiente para trajetos superiores a 500km.

O autor Dias (2012) traz como principais vantagens do transporte ferroviário pontos como baixo custo para grandes distâncias, boa adequação para grandes quantidades de cargas e bom atendimento para produtos de baixo valor e alta densidade. Em contraponto, ele coloca como desvantagem pontos como pouca flexibilidade em relação a serviços e horários, pouca competitividade para cargas pequenas e curtas distâncias, elevados custos nas operações de carga e descarga e a dependência de outros transportes para completar as viagens, uma vez que o transporte é realizado apenas de um terminal a outro.

2.2.1.1.3. *Transporte Aquaviário*

Considerado como um dos modais mais antigos, o transporte hidroviário pode ser dividido também em fluvial, onde as embarcações transitam por meio de lagos e rios, e marítimo, onde a circulação se dá por mares abertos. De acordo com Rodrigues (2007), o transporte fluviolacustre no Brasil é subutilizado devido à falta de investimentos na área, principalmente por conta da dificuldade para interligação de bacias hidrográficas e transposição de obstáculos naturais, já para o transporte marítimo, o autor destaca operações de cabotagem em que os navios circulam na costa do próprio país, e operações de longo curso, quando os navios circulam em rotas internacionais.

Desse modo, Ballou (2006) destaca algumas limitações das vias aquáticas, principalmente para o transporte fluvial, já que esse tipo de transporte obriga seus operadores a se localizar nas vias aquáticas, com a obrigação de utilizar outro modal para complementação de seu serviço, uma vez que os rios e bacias limitam os possíveis destinos das cargas. Além disso, a navegação fluvial é bastante limitada pelas condições do tempo e fatores naturais como épocas de secas e de cheias nos rios.

Porém, mesmo com suas dificuldades, o transporte aquaviário tem seu destaque devido à alta capacidade de movimentação e por circular sempre em vias livres. Segundo Dias (2012), o modal traz como pontos positivos a competitividade para produtos de baixo custo, bom desempenho para viagens de longa distância e boa adaptação para grandes volumes de materiais transportados, tendo em vista sua alta capacidade de movimentação. Porém o autor pontua como desvantagens a velocidade reduzida de circulação, a pouca flexibilidade do modal, e a limitação de transporte devido a circular apenas em zonas com orla marítima, lagoas ou rios navegáveis.

2.2.1.1.4. *Transporte Aéreo*

Esse modal se destaca principalmente devido a sua velocidade de percurso, porém opera a custos muito elevados, devido à eficiência energética baixa e à necessidade de uso de instalações sofisticadas e equipamentos extremamente caros (RODRIGUES, 2007). Segundo Ballou (2006), o modal aéreo tem como diferencial a velocidade atingida durante as viagens, porém deve-se levar em consideração o tempo das operações de coleta e entrega e de manobras terrestres, que para viagens de curta distância podem anular a vantagem da velocidade durante o trajeto.

Por outro lado, o autor Rodrigues (2007) aponta o modal aéreo como próprio para o transporte de cargas específicas que necessitam de transporte ágil, como os bens perecíveis, animais e plantas vivas, bens de alto valor agregado e pouco volume, entre outros casos, em que a velocidade e a segurança de entrega superam o fator custo. Materiais ou produtos que possuem restrição a viagens longas, comumente agregam maior valor ao produto final, fato que compensa os altos custos com o transporte.

Desse modo, Dias (2012) traz como vantagens do modal aéreo os curtos prazos para viagens de longa distância, sendo bem utilizados para cargas de valor elevado, e a boa frequência entre cidades. Em contrapartida, o autor aponta como desvantagens a pouca flexibilidade, uma vez que opera de terminal a terminal, o fato de ter o tempo de percurso comparável ao rodoviário para curtas distâncias, devido aos tempos das operações de pouso e decolagem, e, por fim, o elevado custo para grande parte das mercadorias existentes.

2.2.1.1.5. *Transporte Dutoviário*

O transporte por dutos concentra sua maior utilização no transporte do petróleo cru e seus derivados, além do transporte de gases. Devido à dificuldade ou inviabilidade de transportar outros materiais, o transporte dutoviário é visto como um modal limitado (BALLOU, 2006). As grandes companhias de petróleo e gases são os grandes agentes deste modal, pois tiram grande proveito de sua alta capacidade, considerando que os dutos podem operar praticamente sem interrupções durante as 24 horas do dia e durante os 7 dias da semana, e com baixos custos de operação.

Fatores como a baixa adaptação a diferentes produtos e os altos valores de implantação limitam as expansões das dutovias, mesmo com vantagens como vida útil longa, pouca manutenção, baixa mão de obra e rápido transporte, a dificuldade e os altos custos de implantação exigem diversos estudos de viabilidade para que tais vias sejam implantadas e utilizadas.

2.2.1.2. Transporte Intermodal

O transporte intermodal teve seu maior desenvolvimento impulsionado principalmente pelos fretes internacionais. Este modelo de envio se caracteriza pela utilização de pelo menos dois modais para o transporte da carga da origem até seu destino e pelo intercâmbio de

equipamentos entre os diversos modais, sendo este, na maioria das vezes, o contêiner (BALLOU, 2006).

Para Dias (2012), a intermodalidade se faz pelo transporte da carga por dois ou mais modais, sem que ocorra a quebra da carga, do momento do carregamento até a descarga no destino, porém sua maior característica é que cada embarque é regido por um documento de transporte exclusivo, alterando assim as responsabilidades em relação à carga a cada vez que um novo modal de transporte é utilizado. A necessidade de diferentes documentos de transporte dificulta a identificação do responsável pela carga em cada momento do envio, caso haja ocorrência de perdas ou avarias, o processo de identificação e cobrança do responsável se torna uma tarefa complexa e muitas vezes sem uma devida solução.

Segundo Rodrigues (2007), os problemas de ordem jurídica do transporte intermodal muitas vezes inviabilizam o processo, o qual gera necessidade de coordenar a armazenagem e transbordo entre as trocas de modais, o que, em casos de atraso, podem significar a perda do transporte reservado para a viagem seguinte, gerando assim o frete morto (necessidade de pagamento do frete reservado mesmo sem a ocorrência do embarque).

Como solução para a intermodalidade, foi definida a ideia de apenas um transportador assumir a custódia total da mercadoria, com responsabilização dela por todo o percurso entre coleta e entrega, independentemente de quantas trocas de veículo forem necessárias (RODRIGUES, 2007). A este conceito, de um transportador ser responsável pela carga durante todo o percurso, foi atribuída a definição de Operador de Transporte Multimodal (OTM), na seção abaixo será discutido o conceito de multimodalidade, do OTM e suas principais características.

2.2.1.3. Transporte Multimodal

O transporte multimodal se caracteriza pela utilização de duas ou mais modalidades de transporte para o envio de uma carga da origem até seu destino, diferenciado da intermodalidade por ser regido por apenas um contrato de transporte, atribuindo todas as responsabilidades em relação à carga para o Operador de Transporte Multimodal (OTM), não sendo necessário para o embarcador a execução de outros contratos de trocas de veículo ou armazenagem da carga durante o período do envio (DIAS, 2012).

De acordo com Ballou (2006), a multimodalidade teve como principal impulsionador o transporte internacional, e como ponto chave para o sucesso das operações, o livre

compartilhamento de equipamento entre os modais, este, na maioria das vezes, realizado em contêiner. Este instrumento foi tido como ideal para a efetivação do transporte multimodal uma vez que é indivisível e inviolável, além de facilitar as operações de transbordo da carga (RODRIGUES, 2007).

Segundo Dias (2012), a multimodalidade traz benefícios como melhor utilização da capacidade da matriz de transporte existente, utilização de combinações de modais com mais eficiência, melhor utilização da tecnologia de informação, entre outros. Através do transporte multimodal, os operadores podem oferecer serviços cada vez mais adaptados para cada necessidade de seus clientes, como priorização de tempo de viagem, custos e até emissões de gases, dependendo dos modais escolhidos para cada envio.

Com isso, o autor ressalta alguns pontos para a escolha da combinação modal a ser utilizada no envio origem-destino, sejam eles: tempo de transbordo nos terminais ou esperas em função das interconexões dos transportes, fator financeiro, que a depender do valor da mercadoria pode inviabilizar algum tipo de modal devido ao custo, e o fator geração de viagens, que trata da disponibilidade do transporte para a rota desejada.

Como descrito neste capítulo, a integração modal vem se tornando um fator de otimização na logística dos transportes, pois a possibilidade da melhor utilização da matriz de transportes se apresenta como um diferencial nas operações. De acordo com Fan (2013), o conceito de sincromodalidade foi desenvolvido na Holanda durante os últimos anos e se apresenta como a otimização da multimodalidade, tema que será apresentado na seção seguinte junto a suas principais características.

2.2.1.4. Transporte Sincromodal

De acordo com Van Riessen et al. (2013), a sincromodalidade é definida como planejamento de envio multimodal com possibilidade de troca entre modais de transporte em tempo real. A troca em tempo real se refere à mudança do modal de transporte da carga em casos de atraso ou cancelamento de serviços ou por outros motivos que tornem mais atrativo o envio por outro modal a partir da localização da carga naquele momento.

Já para Defares (2011), o transporte sincromodal se caracteriza pela possibilidade de escolha do envio por diferentes modais de acordo com o cenário em que se encontra cada modal, como casos de impedimento de tráfego marítimo por condições naturais, carregamentos urgentes, baixo nível de água em rios que impeçam a navegação, entre outros.

Devido ao recente surgimento do conceito da sincromodalidade o tema apresenta definições diversas, porém com um conceito comum de possibilidade de intercâmbio da carga entre os modais, em tempo real. Para que este conceito tenha sucesso em sua implementação, os agentes responsáveis pelos modais de transporte devem estar abertos ao compartilhamento de informações uns com os outros a fim de que as decisões de troca entre eles sejam assertivas e tragam benefícios para os envios (DEFARES, 2011). Este modo de transporte se baseia na integração dos modais e no planejamento dos envios de cargas baseados nas diversas possibilidades disponíveis.

A sincromodalidade é idealizada para prover flexibilidade e fácil adaptação as demandas que surgem dos transportes (BEHDANI, 2016). Assim, com base nestes conceitos será desenvolvido neste trabalho uma avaliação da aplicação do conceito de transporte sincromodal, considerando a matriz de transporte brasileira.

2.3. PESQUISA OPERACIONAL

A Pesquisa Operacional teve seu desenvolvimento junto às indústrias nos períodos das grandes guerras. Com o aumento da dimensão das operações, os problemas se tornaram mais complexos, o que incentivou o desenvolvimento de métodos matemáticos para suas resoluções, resultando no surgimento desta, também conhecida como PO. (HILLIER; LIEBERMAN, 2013)

De acordo com Colin (2021), os métodos de matemática aplicada abordados pela PO são comparados a descobertas como divisão do trabalho nas organizações, motor a vapor, tecnologia da informação, entre outros. Devido aos benefícios econômicos proporcionados por esses métodos, a aplicação ganhou destaque tanto em meios acadêmicos quanto em meios organizacionais, principalmente nas grandes organizações.

Hillier e Lieberman (2013) apontam a revolução computacional como a grande impulsionadora da Pesquisa Operacional devido à evolução na capacidade de processamento de cálculos. Tudo isso tornou possível a representação de problemas reais das operações por meio de métodos matemáticos ao considerar dados relevantes, com objetivo de abstrair a essência real dos problemas e com o ponto chave da busca pelo melhor resultado possível, também chamado de solução ótima, atendendo as restrições consideradas.

As aplicações dos métodos de pesquisa operacional costumam abranger diversas áreas nas companhias e, na maioria dos casos, exigem profissionais com expertise em áreas como matemática, estatística, informática, administração, por exemplo. A necessidade de diferentes

profissionais está ligada à técnica de PO utilizada na aplicação. Estas técnicas podem ser escolhidas de acordo com as características do problema e suas variáveis de decisão (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). Nas seções seguintes serão abordadas características referentes à técnica de programação dinâmica, que será utilizada no estudo de caso, além de algumas aplicações apresentadas na literatura.

2.3.1. Programação dinâmica

Colin (2021) classifica a Programação Dinâmica, também conhecida como PD como uma ferramenta muito versátil, pois pode ser utilizada para solucionar problemas com diversas características, como modelos com variáveis lineares ou não lineares, problemas determinísticos ou estocásticos e até com uma combinação deles. Para Hillier e Lieberman (2013), a PD se trata de um tipo genérico de metodologia, tendo em vista que não se tem uma formulação matemática padrão para estes problemas, e sim, um tipo genérico de metodologia em que é necessário adaptar às particularidades de cada problema.

As formulações dos problemas se dão de forma bastante particularizada, porém a PD, especialmente, se mostra útil para modelos que envolvem decisões sequenciais, ou temporais, utilizando uma técnica de decomposição do problema (COLIN, 2021). De acordo com Hillier e Lieberman (2013), “[...] é necessário certo grau de engenhosidade e de insight na estrutura geral dos problemas de programação dinâmica para reconhecer quando e como um problema pode ser resolvido pelos procedimentos dessa mesma programação.” (p. 404).

De acordo com Colin (2021), a solução dos problemas de programação dinâmica consiste em uma técnica de decomposição de um problema grande, em problemas pequenos, que proporcionam maior facilidade em sua resolução. Buscando desta forma a solução ótima para os problemas pequenos de uma forma que a junção de todas as soluções se torne a melhor solução para o problema grande.

Os problemas de Programação Dinâmica possuem algumas características básicas segundo Hillier e Lieberman (2013), são elas:

- O problema deve ser solucionado por uma sequência de decisões, considerando que cada decisão tomada corresponde a um estágio do problema. Com isso, o esquema é composto de uma série de decisões inter-relacionadas.
- Cada etapa do problema que exige uma decisão é composta por um ou mais estados, que correspondem às diversas condições possíveis que o sistema poderia se encontrar naquele estágio do problema.

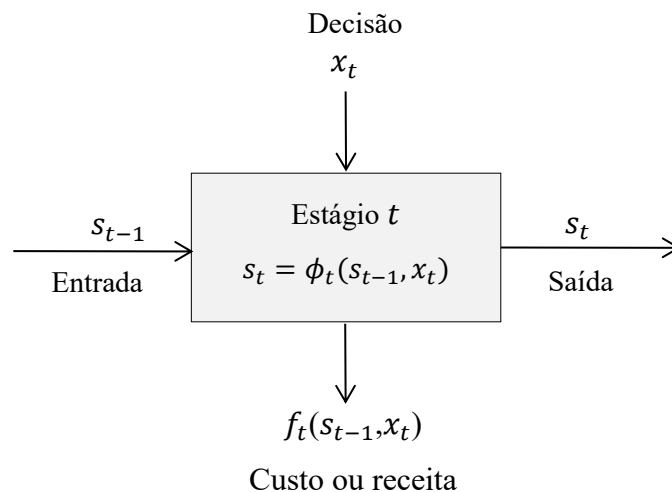
- O problema de PD considera um efeito decisão, normalmente relacionado ao custo de transição de um estágio para o próximo. Sendo que o custo varia dependendo do estado de origem e o estado de destino.
- A fórmula de resolução utilizada pelo método é capaz de encontrar a solução ótima para o problema em geral. Porém, além disso, após solucionado o problema o método informa qual a melhor escolha a ser feita a partir de qualquer estado, independente se até ali as decisões foram as ótimas ou não. Esta informação adicional pode ser útil em casos em que as decisões ótimas iniciais não foram tomadas no problema real, então o modelo indica o melhor caminho a seguir a partir dali.
- A Programação Dinâmica se fundamenta principalmente na propriedade markoviana chamada de princípio da otimalidade de Bellman, que quer dizer que a política ótima a se escolher para os estágios seguintes é totalmente independente dos estágios anteriores. Dado um estado atual, a política ótima a se percorrer a partir dele é independente das políticas utilizadas para chegar até ele. Caso não atenda à esta propriedade, o problema não pode ser modelado como um problema de Programação Dinâmica.
- O formato de resolução adotado pela PD se baseia em encontrar as melhores soluções do problema resolvendo-o do final para o início, dividindo o modelo em problemas menores a cada estágio e, desta forma, facilitando o processo de resolução.
- O procedimento para solução inicia encontrando o caminho ótimo para o último estágio, analisando cada um dos estados possíveis referentes ao estágio anterior. Esta etapa de solução se torna algo simples pois resume o problema a apenas uma transição entre estágios.
- Este modelo de problema pode ser solucionado a partir de uma resolução recursiva, que identifica a política ótima para o estágio atual “ t ”, dado o caminho ótimo para o estágio seguinte “ $t + 1$ ”.
 - O problema pode ser solucionado a partir de uma equação geral de recursividade como:
 - $$f_t^*(s_{t-1}) = \min_{x_t} \{ f_t(s_{t-1}, x_t) + f_{t+1}^*(s_t) \}$$

Colin (2021) descreve o caso genérico da programação dinâmica, a partir de um estágio t , como sendo:

- s_{t-1} : Um estado de entrada;
- s_t : Um estado de saída;
- x_t : Variável efeito de decisão que influencia a saída e o custo;
- $f_t(s_{t-1}, x_t)$: Sendo o ganho (receita) ou a perda (custo) referente a decisão de passar de um estado para outro;
- $f_t^*(s_{t-1})$: custo ótimo da viagem completa a partir de s_{t-1} ;
- ϕ_t : Transformação (ou recorrência) do estágio t que apresenta as saídas como uma função das entradas, sendo: $s_t = \phi_t(s_{t-1}, x_t)$.

A Figura 1 apresenta um esquema com um estágio, com descrição das variáveis de decisão, estados de entrada e de saída, e função de transformação genéricos.

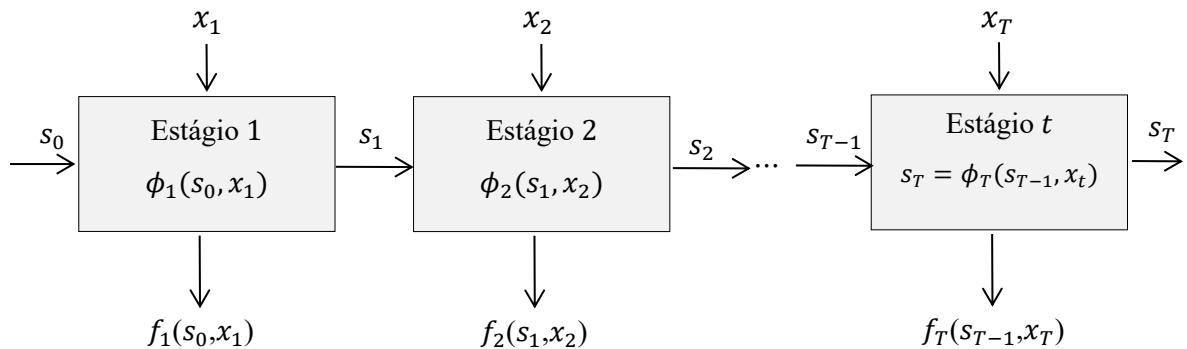
Figura 1- Representação de um estágio do problema



Fonte: Adaptado de Colin (2021).

A Figura 2 ilustra a generalização da abordagem para o caso de haver, em série, T estágios de decisão. E, com a solução ótima para cada subproblema, tem-se em recorrência, a solução ótima para o problema completo.

Figura 2 - Ilustração para modelo de PD com estágios de decisão em série



Fonte: Adaptado de Colin (2021).

O modelo ilustrado na Figura 2 pode considerar variáveis de decisão tanto determinísticas quanto estocásticas, a depender da aplicação considerada. Neste trabalho será utilizado o método de Programação Dinâmica Determinística que será melhor apresentado na seção 2.3.1.1.

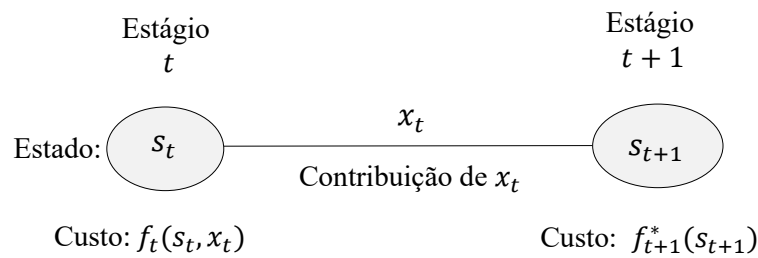
A seguir será abordado o tema de programação dinâmica determinística e na sequência o problema de caminhos mínimos, que serão utilizados na resolução do problema proposto no presente estudo.

2.3.1.1. Programação dinâmica determinística

A Programação Dinâmica Determinística, ou PDD, é classificada para problemas determinísticos, uma vez que, o estado alcançado no estágio seguinte é determinado exclusivamente pela escolha de transformação a partir do estado atual (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). Isto é, ao contrário de problemas probabilísticos, na PDD o próximo estado é determinado exclusivamente pela decisão de transformação atual.

Conforme ilustrado pela Figura 3, o problema de PDD pode ser esquematizado como forma de diagrama. Onde é representada a transição de um estado para outro, referentes aos estágios t e $t+1$, respectivamente, considerando um custo (ou receita) por essa transição que será incorporado à função objetivo f_t .

Figura 3 - Representação em forma de diagrama



Fonte: Adaptado de Hillier e Lierberman (2013).

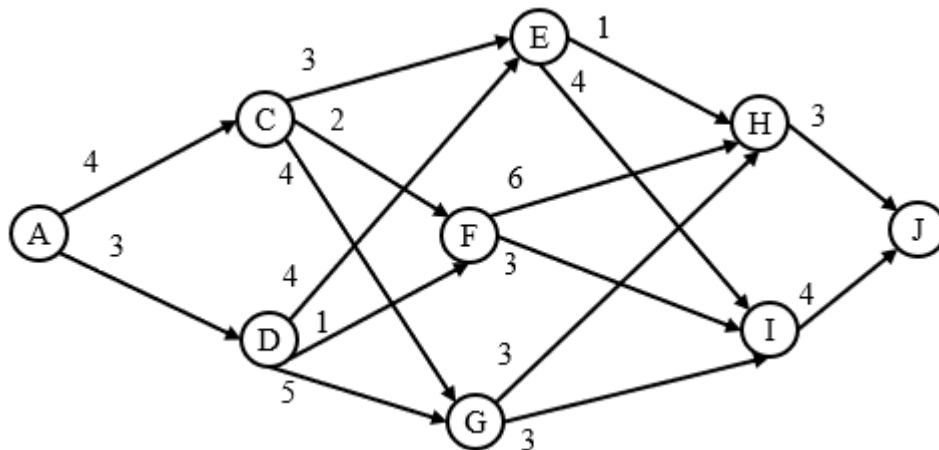
O modelo consiste em calcular todos os valores de transição do penúltimo estágio para o último, após esta análise o modelo trata da transição do antepenúltimo estágio, para o penúltimo, já sabendo as opções de transição do penúltimo para o último, podendo assim avaliar o caminho por completo, sem ter que refazer os cálculos para as transições seguintes. Simplificando, dessa forma, a avaliação de todos os caminhos possíveis para assim encontrar a solução ótima.

2.3.1.2. Problema de Caminhos Mínimos

A Programação Dinâmica, quando aplicada ao problema de caminhos mínimos, pode apresentar muito bem suas características e especificidades (HILLIER; LIERBERMAN, 2013). Para representar este modelo, parte-se da necessidade de se deslocar de um ponto a outro, passando por diversos pontos intermediários que possuem uma distância a ser percorrida a cada transição.

O problema parte do princípio de que o nó inicial e o nó final são conhecidos previamente e que a distância futura, quando o problema se encontra no último nó, é zero. Na Figura 4 temos a representação gráfica do problema abordado, onde se deve “percorrer” o caminho do nó A até o nó J, com a menor distância total possível. Sendo os valores de distância, os números que estão nas arestas de ligação entre os nós.

Figura 4 - Representação gráfica do Problema de Caminhos Mínimos



Fonte: Adaptado de Hillier e Lieberman (2013).

Considerando a distância de transformação entre os estágios, que representa o incremento na função objetivo quando o caminho entre os nós for percorrido pelo problema, o objetivo aqui se trata de realizar o percurso saindo do nó A e indo até o nó J buscando a minimização da função f_t , que representará a distância de se chegar ao estágio T final, representado acima pelo estado J.

A função de distância do problema se baseia na distância atual do avanço de um estágio, somando esta às distâncias futuras até o destino final.

A formulação é representada por:

$$f_t^*(s_{t-1}) = \min_{x_t} f_t(s_{t-1}) = \min_{x_t} \{f_t(s_{t-1}, x_t) + f_{t+1}^*(s_t)\},$$

onde:

$$f_t(s_{t-1}) = \text{distância imediata (estágio } t) + \text{distância futura mínima (estágios } t + 1 \text{ em diante)} = f_t(s_{t-1}, x_t) + f_{t+1}^*(s_t)$$

O problema apresenta a característica recursiva, uma vez que a decisão a ser tomada depende exclusivamente da solução anterior, e pode ser apresentada conforme a Figura 5.

No capítulo seguinte será apresentado o estudo de caso proposto pelo trabalho para a aplicação da Programação Dinâmica Determinística, conforme as definições apresentadas nesta seção.

Figura 5 - Modelo geral de PD

$$Z = \underset{x_t, t=1, \dots, T}{\text{Min ou Máx}} \left\{ \sum_{t=1}^T f_t(s_{t-1}, x_t) \right\}$$

Sujeito à:

$$s_t = \phi_t(s_{t-1}, x_t), \quad t = 1, \dots, T - 1$$

s_0 é um parâmetro conhecido

f_t e ϕ_t podem ter qualquer formato

$$f_{T-1}^*(s_T) = 0$$

Fonte: Adaptado de Collin (2021).

2.4. APLICAÇÕES DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

Na literatura especializada é possível encontrar diversas aplicações da PD tanto para casos fictícios quanto para casos reais. Os autores Bellman e Dreyfus (1962) apresentam a programação dinâmica como ferramenta auxiliar para roteirização de veículos com a utilização de algoritmos, em que é possível otimizar o planejamento das rotas ao considerar restrições de capacidade, tempo e custo.

Já os autores Silver, Pyke e Peterson (1998), apresentam modelos aplicados à gestão de estoque, as quais auxiliam na definição de níveis de estoque ótimo e nas decisões de reposição de produtos. Conforme aplicado por Romano (2022), é possível utilizar linguagem de programação para resolver problemas de gestão de estoques nas empresas que envolvem grande quantidade de dados e estágios de decisão para facilitar a utilização da solução dos subproblemas nas fórmulas de recorrência utilizadas na PD. No trabalho citado, o autor apresenta a elaboração de um algoritmo em linguagem C++ e aplica uma metodologia de estudo de caso para propor um método de controle de estoque para minimizar o custo total do processo de armazenagem e custo de pedido.

A PD pode ser adaptada também a problemas de produção em sistemas de manufatura que apresentam decisões sequenciais, conforme apresentado por Pinedo (2009). A partir da divisão dos processos em atividades sequenciais, é possível determinar a melhor política a ser

utilizada para otimizar o processo por inteiro, o que concebe melhor uso da mão de obra e da infraestrutura disponíveis.

Leite (1993) apresenta a PD para otimização da utilização de recursos florestais: troncos de madeira transformados em subprodutos, considerando o melhor aproveitamento desde os níveis de crescimento das florestas até o rendimento das madeiras retiradas. As diversificações de aplicações são capazes de auxiliar em casos diversos, como o exemplo citado de desmatamento de florestas.

Outras aplicações são apresentadas em Programação da Produção (Pinedo, 2002), Planejamentos de projetos (Moder, Phillips e Davis, 1983), Planejamento de Redes de Telecomunicações (Medhi e Ramasamy, 2007) e Roteirização de Veículos (Bellman e Dreyfus, 1962).

De acordo com o abordado no Congresso Brasileiro de Custos (2003), a programação dinâmica ainda pode ser adotada em uma companhia para gestão de custos e receitas. Já na aplicação proposta, é abordada a otimização de recursos e resultados da distribuição logística de produtos. A possibilidade de aumento de ganhos e redução de gastos das empresas trazida pela programação dinâmica atrai a atenção de lideranças de empresas para suas aplicações. Conforme apresentados, os modelos são capazes de quantificar operações existentes de forma a realizar de melhor forma as atividades.

3. ESTUDO DE CASO

Nesta seção será apresentado o estudo de caso proposto para a aplicação do modelo e as premissas adotadas para sua resolução. A partir destas definições, tem-se a resolução do modelo, seus resultados e conclusões.

3.1. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

A fim de preservar a identidade da empresa a qual motivou o desenvolvimento deste estudo, será nominada Empresa X. Esta companhia tem sua matriz localizada na cidade de Joinville e atua como líder de mercado na produção de tubos e conexões, entre outros produtos de seu portfólio.

Mesmo tendo sua matriz no estado de Santa Catarina, a Empresa X possui seu maior parque fabril no estado de São Paulo, mais precisamente na cidade de Rio Claro. Além destes, a companhia possui unidades em Pernambuco, Minas Gerais, Bahia, Amazonas, entre outras. Importante considerar que as sedes de Pernambuco e Amazonas também possuem parque fabril e as demais apenas Centro de Distribuição.

Esta empresa abastece parte, em alguns casos o total, do estoque de suas unidades com produtos oriundos dos centros de Joinville e de Rio Claro, pois não são todos os parques fabris que produzem todo seu portfólio, alguns itens são produzidos em apenas um centro. Porém, as maiores distribuições ocorrem a partir dos centros de Santa Catarina e São Paulo. Devido a isso, estes envios serão abordados neste estudo de caso.

3.2. PROBLEMÁTICA E ESCOPO DO TRABALHO

Os centros localizados em Minas Gerais, na Bahia e no Espírito Santo são locais onde a empresa possui apenas estrutura de Centro de Distribuição e todo material que é enviado aos clientes a partir dali é abastecido por fretes de transferências vindas de seus centros produtivos.

Mesmo sendo mais vantajoso abastecer os locais por meio de transferências em comparação à instalação de um parque fabril, os valores gastos em frete e as condições de envio

se tornam questões expressivas para os gestores da companhia, o que fomenta estudos para novos modelos de abastecimento dessas unidades.

Conforme apresentado na Figura 6, além dos locais com apenas Centros de Distribuição instalados, a companhia possui outros locais com centro de distribuição que atuam também como parques fabris, que estão localizados nos estados de São Paulo, Pernambuco e Santa Catarina (matriz), os centros são abastecidos entre si para que tenham disponibilidade de todos os itens de seu portfólio.

Figura 6 - Unidades da Empresa X consideradas no estudo



Fonte: O Autor (2023).

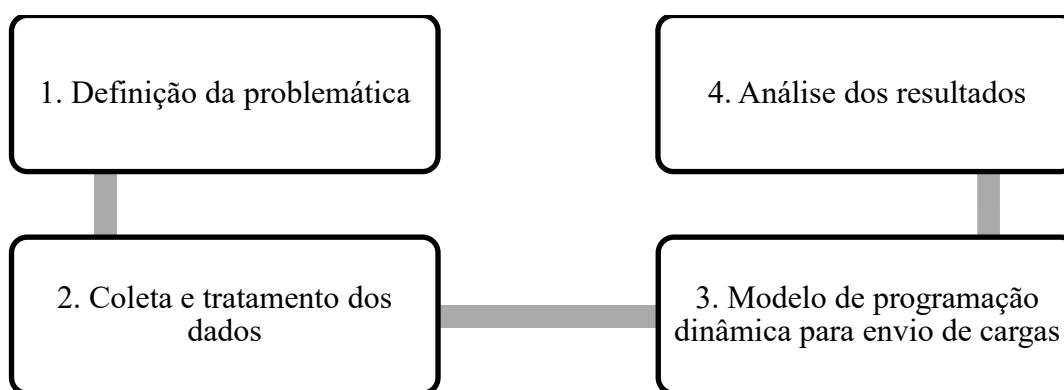
Em vista das necessidades de envios de carga de um centro a outro, este estudo propõe a abordagem apresentada pela sincromodalidade, descrita no capítulo 2, adaptada a um modelo de pesquisa operacional no qual se busca a melhor característica de envio para cada rota, a depender do fator de decisão escolhido, aqui considerado o fator custo.

A seguir serão apresentadas as etapas da solução e como se realizou a coleta e o tratamento dos dados utilizados durante a modelagem e a resolução do problema.

3.3. ETAPAS DO MÉTODO DE SOLUÇÃO

A fim de facilitar o entendimento da modelagem do problema de envio de cargas utilizando sincromodalidade, na Figura 7 são apresentadas as etapas para elaboração e resolução do método de solução utilizado. Estas etapas serão abordadas nas seções seguintes.

Figura 7 - Etapas de solução



Fonte: O Autor (2023).

3.4. PREMISSAS E TRATAMENTO DOS DADOS

Os dados utilizados no presente estudo são referentes ao custo do envio de cargas de uma cidade a outra. Neste custo já estão considerados todos os valores necessários para que a carga seja transportada da origem até o destino, como combustível, pedágios e seguro.

Os dados de valor de frete utilizados, para os modais rodoviário e marítimo, são valores médios de mercado, informados por empresas parceiras da Empresa X, no ano de 2022. Devido ao estudo se tratar de envios em diferentes modais, as capacidades de cada modal utilizadas nos cálculos são as capacidades utilizadas pela Empresa X em seus envios, como descrito a seguir:

- Modal Rodoviário: veículos com 6 eixos, com capacidade de transportar oitenta e quatro metros cúbicos de carga;
- Modais Aquaviário e Ferroviário: carga acondicionada em contêineres com capacidade de transportar setenta metros cúbicos de carga.

Durante a aplicação do modelo haverá casos do em que a rota é composta por mais de um modal e isto representa que a carga deve ser transbordada. Devido ao espaço de um contêiner ser de setenta metros cúbicos e não ser suficiente para acondicionar uma carga rodoviária completa, de oitenta e quatro metros cúbicos, deve-se equalizar a quantidade de transportes necessários para o transporte de uma carga utilizando mais de um modal.

Para que haja uma comparação fidedigna dos custos de envio, vamos considerar os envios sendo realizados em comboios de cinco veículos para o modal rodoviário e de seis contêineres tanto para o modal marítimo quanto para o ferroviário. Desta forma é possível igualar a capacidade do modal rodoviário de transportar quatrocentos e vinte metros cúbicos de carga, com a utilização 5 veículos, à capacidade do envio de 6 contêineres que possibilita o envio da mesma cubagem de carga.

Com isso, para efetuar a comparação entre as viagens em termos de custo, a variável de custo no problema será medida em reais por metro cúbico de carga enviado, este valor será deduzido considerando o valor do frete e a capacidade do envio em questão. Portanto, será considerado o valor de cinco fretes para o modal rodoviário e o valor de seis para o aquaviário e ferroviário. O valor total dos fretes será dividido pelo volume total de carga enviado, que são quatrocentos e vinte metros cúbicos em ambos os casos, obtendo como resultado o custo de se enviar um metro cúbico de material a cada trecho de rota analisado, sendo essa a unidade de medida utilizada na variável de decisão do modelo.

Todos os valores de frete cotados consideraram cargas lotação e a demanda é considerada infinita. E, como em praticamente todas as cargas da Empresa X, o limitador para envio é o volume da carga e não o peso, então, para fins de comparação, o custo do envio foi rateado pela capacidade de cubagem dos veículos.

Para que o modal ferroviário também fosse incluído no estudo, o valor de envio de um contêiner através de ferrovia foi elaborado com base no valor praticado para envio de vagões em uma ferrovia do estado de Minas Gerais. Foi considerado que o valor de envio de um vagão poderia ser o mesmo de envio de um container, dividiu-se assim este valor pela cubagem do container e pela quilometragem referente à rota informada pela empresa parceira. Foi considerado também que diversas ferrovias do país, hoje desativadas, estejam ativas e permitam o transporte de contêineres.

Para a simplificação do modelo, nas rotas em que se utiliza mais de um modal serão desconsiderados custos de transbordo, visto que estes valores podem sofrer alterações a depender da localização e do material que compõe as cargas. Para que se possa generalizar o

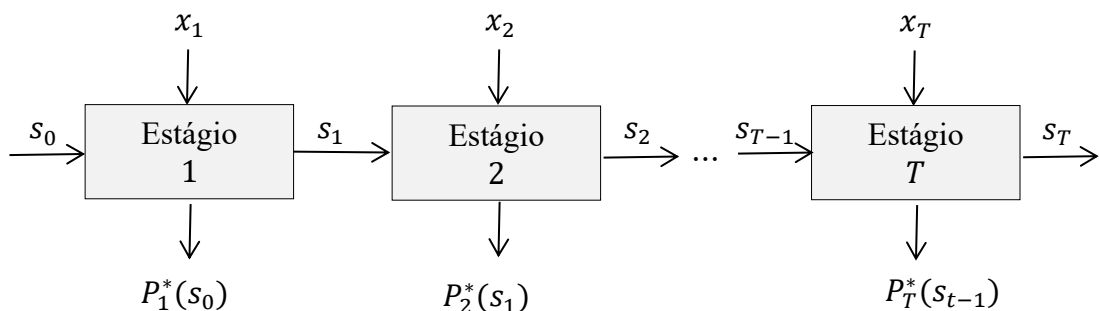
modelo para outros cenários, é necessário avaliar qual seria o impacto dos custos de transbordo para validar seus resultados.

3.5. MODELO DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA DETERMINÍSTICA PARA O ENVIO DE CARGAS UTILIZANDO SINCROMODALIDADE

O modelo deve determinar qual caminho deve ser percorrido a cada novo estágio da viagem, levando em consideração o custo para ir de uma cidade à outra, de forma que seja obtido o menor custo para a viagem completa.

A Figura 8 apresenta um fluxograma geral que representa esquematicamente o método de PDD aplicado ao problema de envio de cargas enfrentado pela Empresa X, definindo para uma sequência de T viagens (estágios) da origem até o destino do material, onde o custo é calculado através da função objetivo P , que representa o custo de percorrer os trechos escolhidos.

Figura 8- Modelo de PD determinística para envio de cargas com T estágios



Fonte: O Autor (2023).

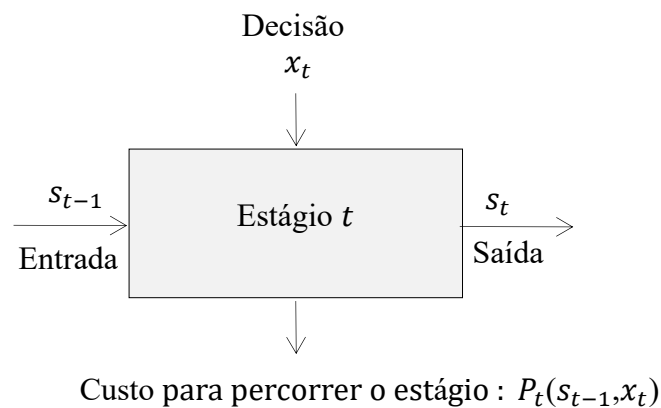
No fluxograma em série ilustrado na Figura 8 podemos considerar T estágios, que representam a quantidade de trechos entre cidades que deverão ser percorridos por algum modal de transporte para se concluir a rota de envio. Em cada estágio tem-se um conjunto de estados possível, composto por uma ou mais cidades, a depender dos modais de transportes possíveis a partir da escolha anterior. Aqui, a variável de decisão x_t , indica a escolha do modal e $P_t(s_{t-1}, x_t)$ indica o custo que será acrescido à viagem completa devido ao trecho e modal escolhidos ao se percorrer de uma cidade s_t a outra cidade s_{t+1} para o avance do estágio t atual.

Cada estágio representa então um caminho percorrido entre duas cidades para chegar à cidade final T , onde o custo do caminho é representado pelo custo de envio de um metro cúbico de material entre as cidades. O modelo de resolução tratado pela PD para problemas de

caminhos mínimos tem o formato de resolução partindo da cidade final da rota, para a cidade inicial. Desta forma iniciando pela cidade final e avaliando todos os trechos possíveis até a cidade de origem para a obtenção do custo mínimo da rota.

Para a solução do modelo (ou esquema) completo, considerando todos os trechos para viajar da cidade de origem escolhida, até a cidade de destino final define-se a equação de recorrência, que permite encontrar as melhores soluções com base na(s) resposta(s) anterior(es).

Figura 9 – Representação do Problema de Envio de Cargas no Estágio t



Fonte: O Autor (2023).

Desta forma, temos a equação de recorrência, do modelo de Programação Dinâmica Determinística aplicado, representada pela Equação 1.

$$\min_{x_t} P_t(s_{t-1}) = P_t(s_{t-1}, x_t) + P_{t+1}^*(s_t) \quad \text{Equação (1)}$$

A recorrência se baseia em encontrar o menor valor da soma dos custos para se percorrer o estágio atual e os trechos futuros até a cidade final s_T , considerando a cidade s_{t-1} atual. Avaliando o custo mínimo da rota a partir de cada cidade possível, o modelo inicia calculando o custo mínimo para a cidade final e segue sua resolução percorrendo os estágios do final para o início da rota, até avaliar o custo mínimo do primeiro estágio somado aos custos futuros, que compreende o primeiro trecho a ser percorrido a partir da cidade de origem, somando-o aos demais trechos da viagem, obtendo assim o custo mínimo da rota por completo.

Algumas premissas do modelo são que o custo futuro do último estágio (T), quando o problema se encontra na cidade final da rota, é definido e nulo, as cidades de origem e destino são definidas para cada rota, as possibilidades de viagem entre cidades são definidas e tem seus

custos determinados de acordo com o trecho e modal, não são permitidas viagens de retorno, apenas viagens de avanço em direção à cidade de destino final, para que assim seja determinado o valor ótimo de menor custo para a viagem completa. Dessa forma, define-se:

- s_0 : a cidade inicial;
- s_T : a cidade final;
- x_t : modal e destino escolhidos para percorrer o caminho no estágio t ;
- $P_t(s_{t-1}, x_t)$: o custo da viagem para avançar para o estágio t considerando o modal e caminho x_t escolhidos.
- No estágio T final, o valor da função P_T é igual a zero;
- $P_t^*(s_{t-1}) = \min_{x_t} P_t(s_{t-1}, x_t)$: custo ótimo para percorrer da cidade atual até a cidade do estágio final;

A partir destas definições temos que, o modelo de Programação Dinâmica Determinística para o caso de envios de cargas utilizando sincromodalidade pode ser formulado conforme a Figura 10. Sendo que a solução ótima é obtida quando é definido o $P_1^*(x_1)$.

Figura 10 - Modelo determinístico de PD

$$P_t^* = \min_{x_{t+1}} P_t(s_{t-1})$$

Sujeito à:

$$s_0 = \text{cidade inicial}$$

$$s_T = \text{cidade final}$$

$$P_{T+1}^*(s_T) = 0$$

$x_t =$ Conjunto de cidades pertencentes ao estágio t

Trechos entre cidades são pré-determinados

Trechos só podem ser percorridos em direção à cidade final

Fonte: O Autor (2023).


Destaca-se que, conforme modelado o problema de Programação Dinâmica definido na Figura 10, onde o custo futuro do último estágio é definido como nulo, tem-se a garantia do atendimento do Princípio de otimalidade de Bellman, definido na seção 2.3.1.

3.5.1 Modelo de programação dinâmica em planilha para o problema de envio de cargas utilizando sincromodalidade

Nesta seção será apresentado em uma planilha o funcionamento do método. Para isso a planilha é organizada com o número de estágios referente a cada rota estudada, cada estágio será um ponto de escolha de para qual cidade seguir a partir da cidade atual. A planilha conta com variáveis e equações consideradas no modelo de PDD proposto.

O Quadro 1 apresenta a estrutura de resolução do modelo de PDD aplicado ao envio de cargas utilizando sincromodalidade, para um caso com quatro estágios.

Quadro 1-Modelo de PDD para o envio de cargas utilizando sincromodalidade.

ROTA								
ESTÁGIO	ESTADO ATUAL	ESTADO FUTURO ESCOLHIDO	MODAL	CUSTO ATUAL	CUSTOS FUTUROS	CUSTOS TOTAIS (ATUAL+FUTUROS)	CUSTO ÓTIMO DO ESTADO	ESTADO DO CUSTO ÓTIMO
(t)	S_t	x_t		$P_t(s_t, x_t)$	$P_{t+1}^*(s_{t+1})$	$P_t(s_t, x_t) + P_{t+1}^*(s_{t+1})$	$P_t^*(s_t)$	S_{t+1}^*
4								
3								
2								
1								

Fonte: Autor (2023).

A primeira coluna do Quadro 1 define os estágios, que limita os trechos possíveis entre cidades a cada estágio da rota. A segunda e terceira coluna apresentam as cidades de origem e destino, respectivamente, sendo que cada linha representa uma possibilidade de viagem de uma cidade a outra. Na quarta coluna, tem-se o modal utilizado no trecho, na seguinte, o seu custo.

Esta primeira parte da planilha tem foco em apresentar as possíveis segmentações da rota completa, seus custos e modais utilizados. Na sequência são apresentados os custos posteriores dos trechos, os melhores valores encontrados e a escolha de rota ótima a partir de cada cidade do modelo.

A sexta coluna apresenta os custos futuros ótimos, considerando que o modelo irá percorrer a rota da linha em questão. A coluna sete representa a soma da coluna cinco com a seis, que é o custo da viagem do estado atual até o destino final, considerando o trecho escolhido, e o custo ótimo a partir da cidade de destino do trecho até a cidade do último estágio.

A penúltima coluna apresenta o custo ótimo para cada cidade de origem referente ao estágio analisado, e a última coluna apresenta a cidade destino com menor custo total da rota a partir da cidade de origem considerada.

3.5.2. Modelo de lógica para resolução do problema de envio de cargas utilizando sincromodalidade através da programação dinâmica determinística

A lógica utilizada para desenvolver o modelo de PDD implementado em planilhas do Excel® é baseada na sequência apresentada na Figura 11, onde são avaliados os custos para transição dos estágios a partir de cada estado existente no problema. O método inicia a partir do estado final e segue avaliando os estados dos estágios anteriores até que o estado inicial seja avaliado, tendo assim o custo mínimo para a rota completa.

Figura 11 – Passos considerados para a aplicação da PDD.

1. Defina os estágios possíveis e os estados pertencentes a cada estágio;
2. Defina os custos para percorrer os caminhos possíveis entre os estados;
3. Defina os estados inicial e final, atribuindo o valor zero ao custo de percorrer o último estágio.
4. Início laço de repetição do algoritmo a partir do último estágio:
 - 4.1. Avalia o custo de se percorrer do(s) estado(s) possível(s) no estágio atual ao estágio seguinte;
 - 4.2. Atribui o menor valor a partir de cada opção do estágio atual para percorrer até o próximo estágio somado aos custos futuros. Sendo este o valor ótimo da rota a partir do estado em questão;
5. Repita o passo 4.1 e 4.2 para os estados e estágios anteriores até que o primeiro estágio seja analisado.

Fonte: Adaptado de Hillier e Lieberman (2013).

No Capítulo 4 são apresentados os resultados, discussões e observações referentes ao modelo aplicado, bem como suas limitações e possíveis ajustes para que se tenha uma ferramenta útil para escolha de rotas no envio de cargas.

4. RESULTADOS

Considerando as demandas de envio de cargas oriundas da Empresa X, o método de pesquisa operacional aplicado para a resolução dos casos e as informações de valores de frete fornecidas por empresas parceiras, é possível obter resultados que permitem uma visão crítica quanto aos valores representados pelos transportes na companhia e a utilização de envios sincromodais para abastecimento das unidades da companhia. Durante o capítulo 4 serão apresentados e discutidos os resultados da aplicação do método de Programação Dinâmica Determinística utilizando planilhas, para as rotas de envio determinadas.

4.1. CENÁRIOS PROPOSTOS PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO

Os cenários aplicados no estudo se baseiam nas necessidades de abastecimento de estoques de produtos da Empresa X em diversas cidades brasileiras. Neste trabalho foram tratadas 6 rotas distintas compostas pelas cidades de Joinville (SC), Escada (PE), Rio Claro (SP), Contagem (MG) e Serra (ES) atuando como locais de origem ou destino dos envios.

Os casos foram abordados considerando o envio de lotes de quatrocentos e vinte metros cúbicos de carga que representam cinco veículos rodoviários (caminhão) ou então seis contêineres para os modais ferroviário e aquaviário. Devido a variação nos valores de transbordo, dependendo do material transportado e do local, foram desconsiderados valores de possíveis gastos com estas operações, para quando se tratar de transportes com mais de um modal utilizado.

Devido à demanda contínua por abastecimentos dos centros de distribuição os transportes ganham destaque devido a representatividade dos custos de frete para o orçamento da companhia, no presente estudo são abordadas as cinco principais rotas de abastecimento no Brasil.

O método aplicado é capaz de fornecer diversas informações e percepções críticas sobre os envios, através da informação de melhor rota a partir de qualquer cidade escolhida, o método permite ao transportador identificar as melhores alternativas para eventos não previstos como grandes engarrafamentos, grandes chuvas ou desastres naturais.

No primeiro cenário é abordada a rota com a origem sendo a cidade de Joinville (SC) e tendo como destino a cidade de Escada (PE). No Brasil, de acordo com dados da CNT, o modal rodoviário é responsável por mais de 60% do transporte de cargas.

O segundo cenário conta com a análise da rota entre as cidades de Rio Claro (SP) e Serra (ES), sendo respectivamente a origem e o destino, este caso considera a possibilidade de existir linhas ferroviárias para envio de contêineres entre as cidades de Jundiaí (SP) e Santos (SP) e, Jundiaí (SP) e Rio de Janeiro (RJ).

Já o terceiro cenário é composto pelas cidades de origem e destino sendo Joinville (SC) e Rio Claro (SP), respectivamente.

Para o quarto cenário foi selecionada a rota com origem na cidade de Rio Claro (SP) e destino a cidade de Contagem (MG).

A quinta e última rota é representada pelas cidades de origem e destino sendo, respectivamente, Rio Claro (SP) e Pernambuco (PE).

Com base nos cenários propostos, será aplicado o método elaborado via planilhas para calcular as rotas ótimas com base nos custos dos envios. Após aplicado, o método é capaz de trazer o melhor custo para completar as viagens independente do estágio que se encontre na rota.

4.2. RESULTADOS OBTIDOS POR CENÁRIO PROPOSTO

Nesta seção será apresentada a aplicação do modelo em planilhas para os cinco cenários propostos. Conforme comentado durante o trabalho, em rotas que utilizem de mais de um modal de transporte, serão desconsiderados os possíveis custos de transbordo das cargas.


As cidades intermediárias de cada rota foram escolhidas devido à presença de portos, ferrovias ou por serem cidades pertencentes ao trecho que possam representar a transação entre estágios da viagem. Na seção seguinte tem-se o início da descrição das aplicações.

4.2.1. Cenário 1 – Rota Joinville (SC) - Escada (PE)

No Quadro 2, apresenta-se os resultados obtidos com a implementação do modelo proposto para a rota que parte de Joinville (SC) rumo a cidade de Escada (PE), chamada aqui de rota 1. Essa rota conta com 3 estágios e 7 estados possíveis, sendo que no primeiro estágio ao partir de Joinville pode-se ir para as cidades de Itajaí (SC), Santos (SP) ou Rio Claro (SP), após ser percorrido o primeiro estágio, no segundo, existem dois destinos possíveis que são

Cabo de Santo Agostinho (PE) e Feira de Santana (BA), para que então no terceiro estágio seja percorrido o último trecho com destino à cidade de Escada (PE).

Quadro 2 - Modelo PDD para o Cenário 1

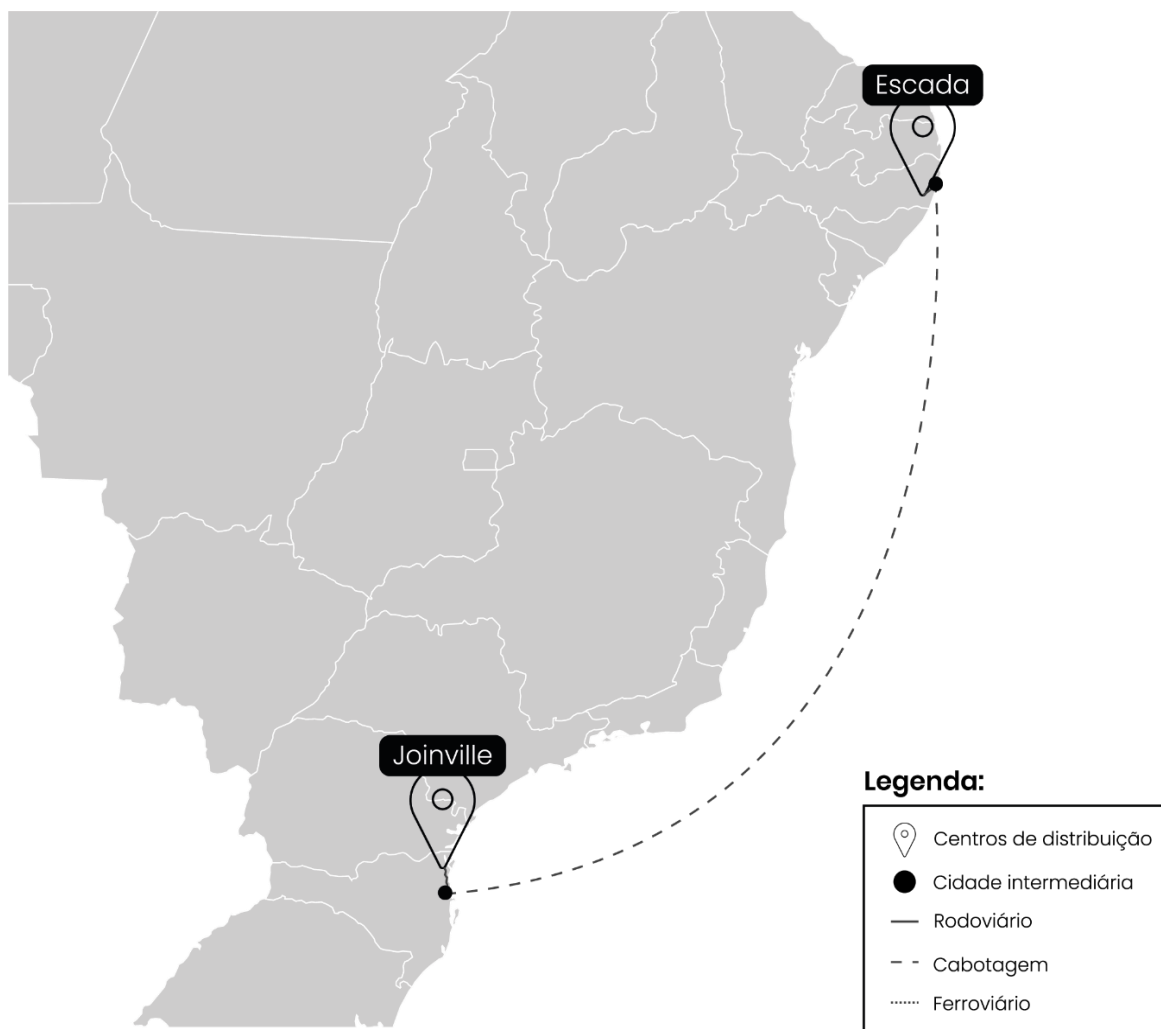
CENÁRIO 1: JOINVILLE -> ESCADA								
ESTÁGIO (t)	ESTADO ATUAL s_t	ESTADO FUTURO ESCOLHIDO x_t	MODAL 	CUSTO ATUAL $P_t(s_t, x_t)$	CUSTOS FUTUROS $P_{t+1}^*(s_{t+1})$	CUSTOS TOTAIS (ATUAL+FUTUROS) $P_t(s_t, x_t) + P_{t+1}^*(s_{t+1})$	CUSTO ÓTIMO DO ESTADO $P_t^*(s_t)$	ESTADO DO CUSTO ÓTIMO s_{t+1}^*
3	CA	ES	R	20,04	0,00	20,04	20,04	ES
	FS	ES	R	63,27	0,00	63,27	63,27	ES
2	IT	CA	C	145,71	20,04	165,75	165,75	CA
	IT	FS	R	206,04	63,27	269,31		
	SA	CA	C	150,00	20,04	170,04	170,04	CA
	SA	FS	R	154,21	63,27	217,47		
	RC	CA	R	203,75	20,04	223,79		
	RC	FS	R	150,28	63,27	213,55	213,55	FS
1	JO	IT	R	24,82	165,75	190,57	190,57	IT
	JO	SA	R	54,55	170,04	224,59		
	JO	RC	R	61,51	213,55	275,05		

Fonte: O Autor (2023).

Como a resolução do método ocorre do final para o início, o estágio número 3 se trata do último trecho da rota e, por consequência, o último estágio da rota 1 é o número 1. Pode-se observar na aplicação da planilha que a cada estágio percorrido, são avaliadas todas as possibilidades de viagem a partir da cidade atual, para dessa forma o método indicar qual a rota ótima a partir de cada cidade, tendo em vista, a solução do estágio seguinte.

Conforme ilustrado na Figura 12 a rota com menor custo, identificada pelo modelo, parte da cidade de Joinville via modal rodoviário até a cidade de Itajaí, onde segue via cabotagem (modal marítimo) até Cabo de Santo Agostinho, onde finaliza a viagem até a cidade de Escada via modal rodoviário.

Figura 12 - Rota ótima para o cenário 1




Fonte: O Autor (2023).

4.2.2. Cenário 2 – Rota Rio Claro (SP) - Serra (ES)

O cenário 2, também chamado de rota 2, é composto por 7 cidades intermediárias entre a origem e o destino e, também, por quatro estágios de escolha. As cidades intermediárias da rota 2 são Jundiaí (SP), Campinas (SP), Santos (SP), Rio de Janeiro (SP), Volta Redonda (RJ), Vitória (ES) e Guarapari (ES). Dentre essas, existem possibilidades de utilização dos três modais abrangidos no estudo, que são o rodoviário, o marítimo e o ferroviário. Conforme o Quadro 3 tem-se a opção de utilização do modal ferroviário no segundo estágio e a opção da cabotagem no terceiro, além da opção via modal rodoviário em todos os trechos.

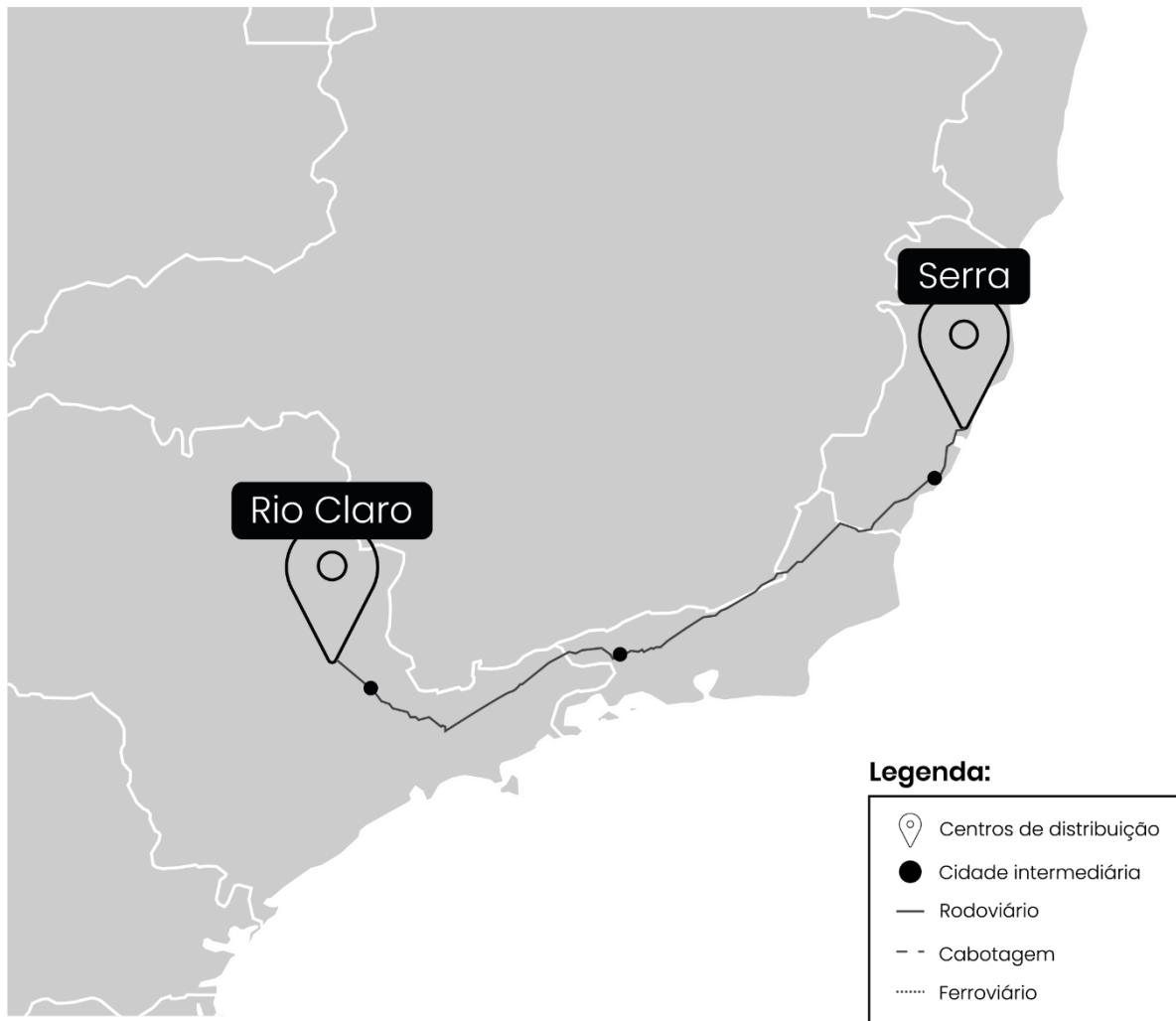
Quadro 3 - Modelo PDD para o Cenário 2

CENÁRIO 2: RIO CLARO -> SERRA								
ESTÁGIO (t)	ESTADO ATUAL S_t	ESTADO FUTURO ESCOLHIDO X_t	MODAL 	CUSTO ATUAL $P_t(s_t, x_t)$	CUSTOS FUTUROS $P_{t+1}^*(s_{t+1})$	CUSTOS TOTAIS (ATUAL+FUTUROS) $P_t(s_t, x_t) + P_{t+1}^*(s_{t+1})$	CUSTO ÓTIMO DO ESTADO $P_t^*(s_t)$	ESTADO DO CUSTO ÓTIMO S_{t+1}^*
4	VI	SE	R	6,96	0,00	6,96	6,96	SE
	GA	SE	R	22,30	0,00	22,30	22,30	SE
3	SA	VI	C	115,93	6,96	122,89	122,89	VI
	SA	GA	R	102,37	22,30	124,67		
	RJ	VI	C	115,00	6,96	121,96		
	RJ	GA	R	47,20	22,30	69,50	69,50	GA
	VR	GA	R	46,48	22,30	68,78	68,78	GA
2	JU	SA	F	64,29	122,89	187,17	187,17	SA
	JU	RJ	F	160,71	69,50	230,21		
	CP	SA	R	23,48	122,89	146,37		
	CP	RJ	R	44,35	69,50	113,85		
	CP	VR	R	37,21	68,78	105,99	105,99	VR
1	RC	JU	R	21,47	187,17	208,65		
	RC	CP	R	15,58	105,99	121,56	121,56	CP

Fonte: O Autor (2023).

Conforme apresentado no quadro a melhor rota para o cenário 2, considerando os custos dos modais para cada trecho, parte de Rio claro, seguindo até Campinas, depois passa por Volta Redonda, em seguida passa por Guarapari, e por fim chega à cidade de Serra, sendo todos os trechos percorridos via modal rodoviário, conforme a Figura 13.

Figura 13 - Rota ótima para o cenário 2




Fonte: O Autor (2023).

4.2.3. Cenário 3 – Rota Joinville (SC) - Rio Claro (SP)

Para a rota 3, abrangida pelo Cenário 3, tem-se a rota com origem na cidade de Joinville e com destino final a cidade de Rio Claro, sendo esta a principal rota de envio de transferências da Empresa X. Neste caso são apresentadas opções de envio multimodais tanto entre os modais rodoviário e ferroviário, quanto entre modais rodoviário e marítimo, sendo que nesses casos o modal rodoviário é o responsável pelo primeiro e último trecho da viagem, conforme apresentados no Quadro 4.

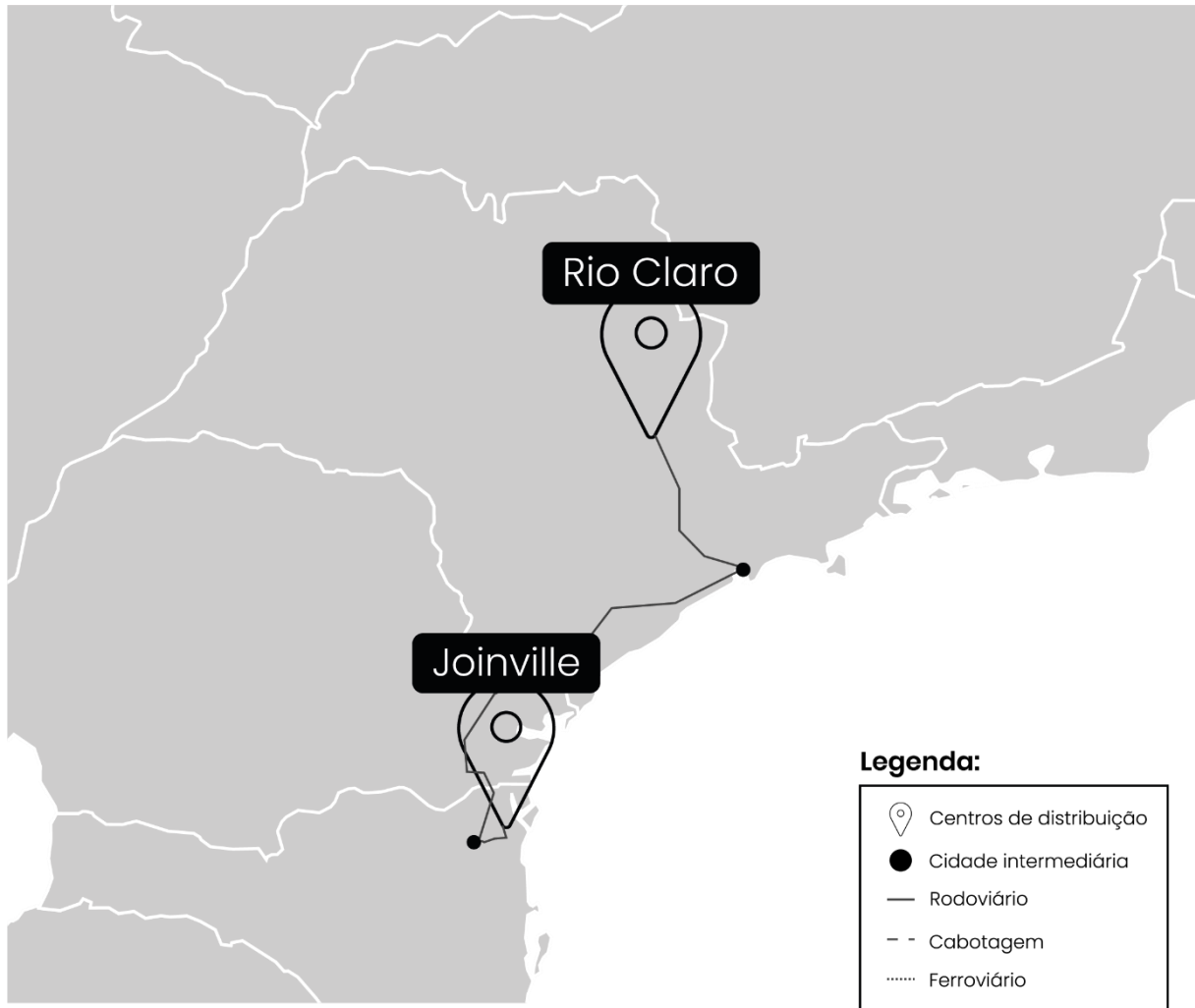
Quadro 4 - Modelo PDD para o Cenário 3

CENÁRIO 3: JOINVILLE -> RIO CLARO								
ESTÁGIO	ESTADO ATUAL	ESTADO FUTURO ESCOLHIDO	MODAL	CUSTO ATUAL	CUSTOS FUTUROS	CUSTOS TOTAIS (ATUAL+FUTUROS)	CUSTO ÓTIMO DO ESTADO	ESTADO DO CUSTO ÓTIMO
(t)	S_t	X_t		$P_t(S_t, X_t)$	$P_{t+1}^*(S_{t+1})$	$P_t(S_t, X_t) + P_{t+1}^*(S_{t+1})$	$P_t^*(S_t)$	S_{t+1}^*
3	TA	RC	R	24,82	0,00	24,82	24,82	RC
	SA	RC	R	36,72	0,00	36,72	36,72	RC
	SO	RC	R	23,19	0,00	23,19	23,19	RC
2	JA	TA	F	192,86	24,82	217,67		
	JA	SA	R	56,85	36,72	93,57	93,57	SA
	IT	TA	R	61,28	24,82	86,09	86,09	TA
	IT	SA	C	87,00	36,72	123,72		
	SJ	SO	R	53,10	23,19	76,29	76,29	SO
1	SJ	SA	R	45,46	36,72	82,18		
	JO	JA	R	12,91	93,57	106,48	106,48	JA
	JO	IT	R	24,82	86,09	110,91		
	JO	SJ	R	31,07	76,29	107,35		

Fonte: O Autor (2023).

O Quadro 4 apresenta a rota com menor custo partindo de Joinville, passando por Jaraguá do Sul, Santos e chegando em Rio Claro, sendo todos os trechos percorridos via modal rodoviário, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Rota ótima para o cenário 3




Fonte: O Autor (2023).

4.2.4. Cenário 4 – Rota Rio Claro (SP) - Contagem (MG)

No caso do cenário 4, considera-se a rota entre as cidades de Rio Claro, SP, e Contagem, MG, que possuem distância rodoviária de pouco menos de seiscentos quilômetros. A rota é composta por 3 estágios, apresentados no Quadro 5.

Quadro 5- Modelo PDD para o Cenário 4

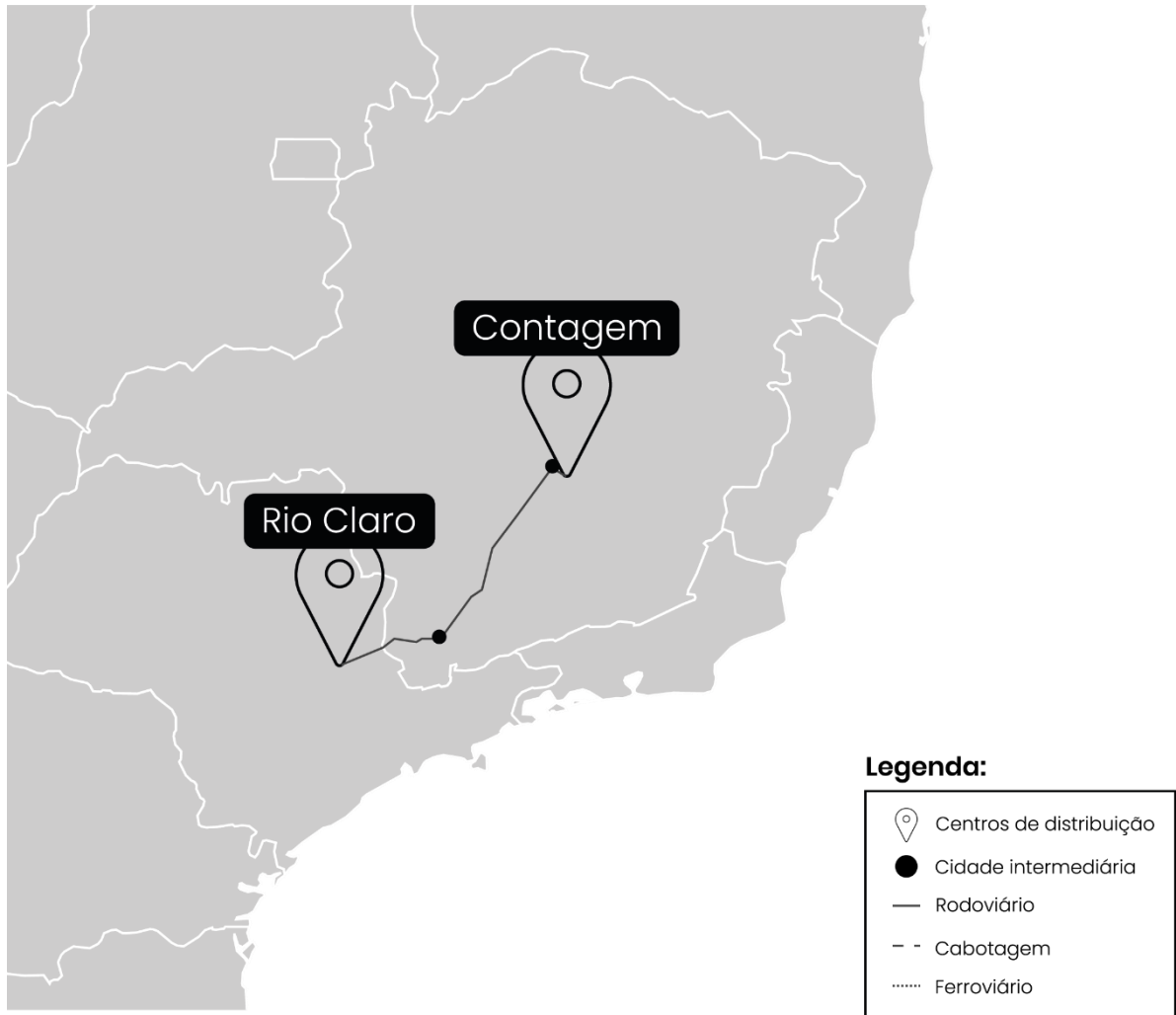
CENÁRIO 4: RIO CLARO -> CONTAGEM								
ESTÁGIO	ESTADO ATUAL	ESTADO FUTURO ESCOLHIDO	MODAL	CUSTO ATUAL	CUSTOS FUTUROS	CUSTOS TOTAIS (ATUAL+FUTUROS)	CUSTO ÓTIMO DO ESTADO	ESTADO DO CUSTO ÓTIMO
(t)	S_t	X_t		$P_t(s_t, x_t)$	$P_{t+1}^*(s_{t+1})$	$P_t(s_t, x_t) + P_{t+1}^*(s_{t+1})$	$P_t^*(s_t)$	S_{t+1}^*
3	IB	CO	R	11,90	0,00	11,90	11,90	CO
	RJ	CO	R	37,48	0,00	37,48	37,48	CO
	BT	CO	R	6,77	0,00	6,77	6,77	CO
2	JU	IB	F	225,00	11,90	236,90		
	JU	RJ	F	160,71	37,48	198,19	198,19	RJ
	SA	IB	R	61,08	11,90	72,98	72,98	IB
	SA	RJ	C	98,43	37,48	135,90		
	PA	RJ	R	44,84	37,48	82,32		
	PA	BT	R	37,87	6,77	44,64	44,64	BT
1	RC	JU	R	21,47	198,19	219,66		
	RC	SA	R	24,82	72,98	97,80		
	RC	PA	R	30,56	44,64	75,19	75,19	PA

Fonte: O Autor (2023).

A rota ilustrada na tabela 5 é composta por seis cidades intermediárias que se dividem em dois estágios, tendo, também, a possibilidade de uso tanto somente do modal rodoviário, quando dos modais ferroviário e marítimo, utilizando o rodoviário como complemento no primeiro e último trecho.

De acordo com o quadro 5, tem-se que a rota de custo mínimo parte da cidade de Rio Claro para Pouso Alegre, em seguida passa por Betim e por fim chega à cidade de Contagem, sendo todos os trechos percorridos por modal rodoviário conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Rota ótima para o cenário 4




Fonte: O Autor (2023).

4.2.5 Cenário 5 – Rota Rio Claro (SP) - Escada (PE)

A quinta, e última, rota é composta pelas cidades de Rio Claro (SP) e Escada (PE) sendo a origem e o destino, respectivamente. Este caso compreende cinco outras cidades divididas em 2 estágios intermediários que possuem tanto opções de envio apenas via modal rodoviário, quanto opções que utilizam da multimodalidade entre rodoviário e cabotagem. Sendo que as opções de cabotagem podem tanto ter origem na cidade de Santos (SP) quanto na cidade de Rio de Janeiro (RJ).

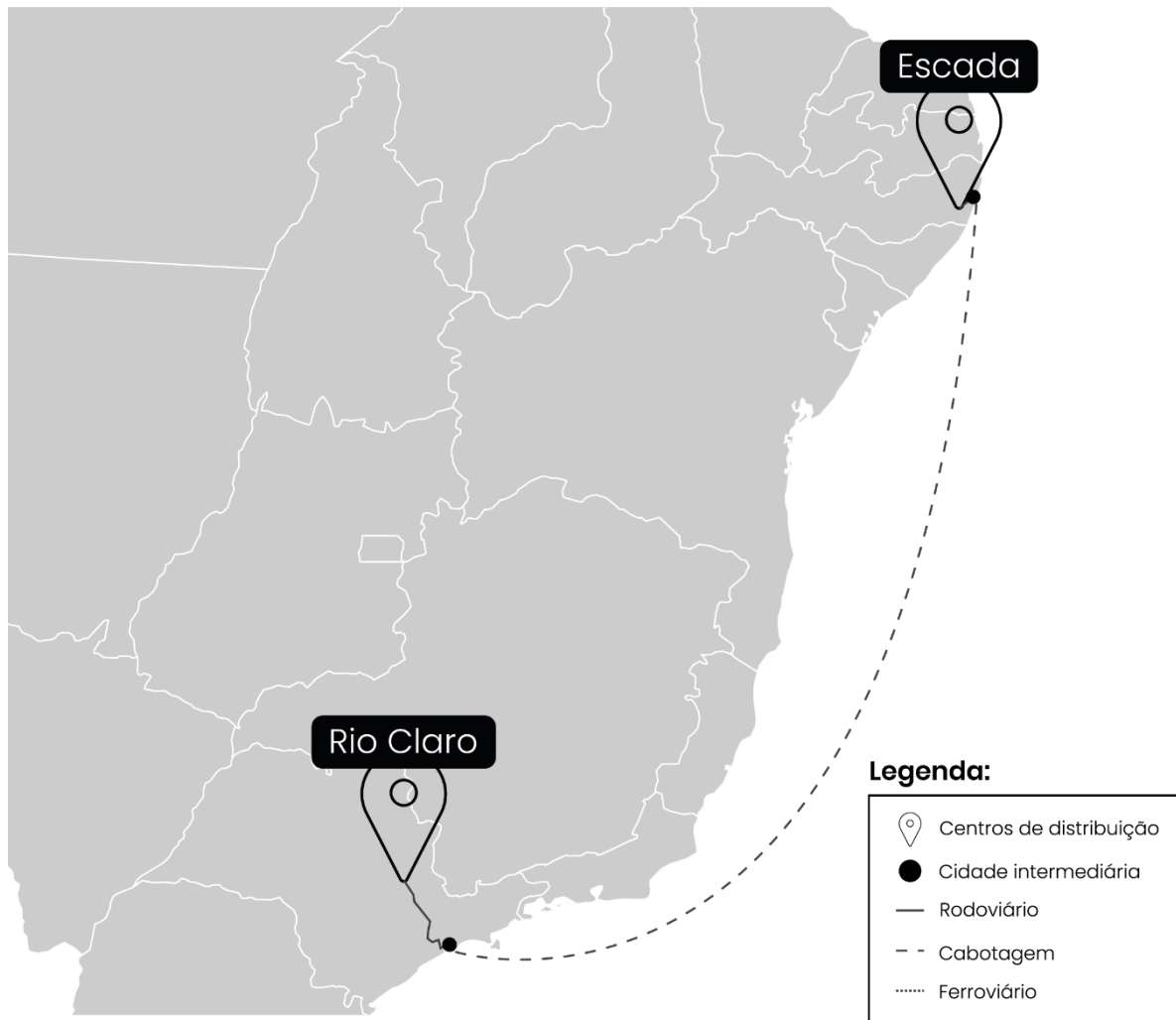
Quadro 6 - Modelo PDD para o Cenário 5

CENÁRIO 5: RIO CLARO -> ESCADA								
ESTÁGIO (t)	ESTADO ATUAL S_t	ESTADO FUTURO ESCOLHIDO X_t	MODAL 	CUSTO ATUAL $P_t(s_t, x_t)$	CUSTOS FUTUROS $P_{t+1}^*(s_{t+1})$	CUSTOS TOTAIS (ATUAL+FUTUROS) $P_t(s_t, x_t) + P_{t+1}^*(s_{t+1})$	CUSTO ÓTIMO DO ESTADO $P_t^*(s_t)$	ESTADO DO CUSTO ÓTIMO S_{t+1}^*
3	CA	ES	R	20,04	0,00	20,04	20,04	ES
	FS	ES	R	63,27	0,00	63,27	63,27	ES
2	SA	CA	C	150,00	20,04	170,04	170,04	CA
	SA	FS	R	154,21	63,27	217,47		
	RJ	CA	C	154,29	20,04	174,32	174,32	CA
	RJ	FS	R	121,54	63,27	184,81		
	BT	FS	R	108,75	63,27	172,01	172,01	FS
1	RC	SA	R	24,82	170,04	194,85	194,85	SA
	RC	RJ	R	55,47	174,32	229,79		
	RC	BT	R	58,89	172,01	230,91		

Fonte: O Autor (2023).

Para o cenário 5, o Quadro 6 apresenta como melhor rota o caminho que parte da cidade de Rio Claro para Santos, de Santos para Cabo de Santo Agostinho e, por fim, da cidade de Cabo de Santo Agostinho para a cidade de Escada, conforme ilustrado pela Figura 16.

Figura 16 - Rota ótima para o cenário 5



Fonte: O Autor (2023).

4.3. DISCUSSÕES

Após definidas as necessidades de envio da Empresa X, pode-se aplicar o método de PDD ao utilizar-se de planilhas eletrônicas para que se pudesse as diversas opções de transporte nas rotas. O modelo traz uma abordagem comparativa entre as possíveis rotas e se mostrou coerente com a proposição dos cenários ao encontrar as melhores opções de trechos a serem percorridos para que pudesse concluir as rotas com o menor custo total dentre as opções.

Ao se comparar os resultados dos cinco cenários, tem-se que em três casos a rota ótima se dá pelo transporte unimodal através de rodovias e em dois casos a rota ótima é composta pelo envio multimodal, com uso de rodovia e transporte marítimo. Um ponto importante é que as duas rotas que tiveram seu custo ótimo envolvendo multimodalidade possuem distância

rodoviária entre origem e destino maiores que dois mil quilômetros, o que favorece o transporte via cabotagem.

Para os cenários 1 e 5, o transporte marítimo se apresenta como a melhor opção, devido aos envios serem caracterizados como grandes distâncias e origem e destino próximos ao litoral. Na primeira rota analisada, o valor do frete utilizando os transportes rodoviário e marítimo se apresentou 30% mais barato que o envio exclusivamente pelo modal rodoviário. E para o cenário 5, essa diferença foi próxima de 16% no valor do custo do frete. Estes resultados corroboram com as definições de viabilidade do transporte por cabotagem para longas distâncias, principalmente no Brasil devido a sua extensa área litorânea.

Para a rota mais curta analisada durante o trabalho, entre Rio Claro e Contagem, o custo do envio multimodal pode se apresentar até três vezes mais caro do que o unimodal através de rodovias. Este caso se dá tanto pela facilidade de acesso apresentada pelos transportes rodoviários, quanto pelo baixo desenvolvimento no transporte ferroviário de contêineres no Brasil.

Para o cenário 2, com distância rodoviária entre origem e destino próxima a mil quilômetros, o transporte unimodal rodoviário teve o menor custo, visto que a multimodalidade com cabotagem junto ao rodoviário se apresentou aproximadamente 30% mais cara, e o transporte utilizando os três modais abordados teve um custo 70% mais caro que o envio apenas por rodovias.

Além de apresentar as melhores rotas, para os cenários propostos, o modelo traz também informações importantes para cenários em que seja essencial que alguma cidade do trecho esteja na rota. Como exemplo no cenário 1, caso seja necessária a passagem pela cidade de Santos, o modelo indica, a partir desta, quais as cidades que devem ser percorridas para que se tenha o menor custo total. Que, neste caso, após passar por Santos, o transporte deve seguir para Cabo de Santo Agostinho ao invés de Feira de Santana, para assim chegar ao destino com menor custo possível a partir da premissa definida, de visitar a cidade de Santos.

A aplicação do modelo permite ilustrar de forma visual e prática, as possibilidades de mudança de rota e quais as alterações em seus custos irão ocorrer. A partir das mesmas definições e da mesma modelagem, apenas com a coleta de dados referentes aos tempos de viagem de cada trecho; é possível alterar a abordagem para o tempo de trânsito das rotas a fim de proporcionar transportes mais ágeis quando as entregas rápidas forem a principal necessidade.

5. CONCLUSÃO

Os modelos matemáticos de otimização aplicados aos problemas reais das empresas são capazes de trazer novas abordagens e novos pontos de vista para o mundo corporativo a fim de aumentar as vantagens competitivas frente aos seus concorrentes. Entre esses modelos, destacam-se os modelos de programação dinâmica, reconhecida como uma poderosa ferramenta de auxílio na tomada de decisão em problemas logísticos de planejamento.

Junto ao crescimento populacional, a distribuição de produtos ganhou grande relevância para os negócios, em que uma alta conta com fretes pode inviabilizar a venda de produtos em determinada região ou pode se apresentar como uma vantagem para quem faz o melhor uso dos transportes.

No presente estudo foram analisados cinco cenários da malha de abastecimento dos centros de distribuição da Empresa X, que possui a maior parte de sua produção concentrada em 2 unidades e abastece suas demais através de envios, em sua maior parte, via modal rodoviário. Devido à ausência de uma ferramenta de comparação para os possíveis trajetos utilizando outros modais ou até outras rotas, a companhia dificilmente avalia novas possibilidades de envio, e opta, assim, pelo uso exclusivo do modal rodoviário em quase todos seus envios.

Neste trabalho apresentou-se um modelo de Programação Dinâmica Determinística implementado em planilhas para avaliar as possibilidades de trecho a serem percorridos em cada rota, em diferentes modais, com objetivo de minimizar o custo total dos envios nos cinco cenários propostos.

O modelo apresentado divide o problema em subproblemas sequenciais, que são resolvidos dinamicamente com uma equação de recursão. Inicia-se a solução a partir do último subproblema, no qual há apenas um estágio para decisão (última entrega). A cada iteração subsequente, o problema é aumentado incrementando-se uma unidade de estágios remanescentes para se completar a jornada. Para esse problema aumentado, a solução ótima para qual modal escolher em seguida de cada possível estado é encontrada com base nos resultados obtidos na iteração precedente. Para a escolha do modal que minimiza os custos do trajeto, considerou-se os custos de frete referentes a cada trecho. Ao final do processo, tem-se

uma solução que indica quais modais escolher em cada trecho de modo que se tenha o menor custo total para a rota completa.

Para as cinco rotas consideradas no estudo, o modelo aplicado foi capaz de apresentar o menor custo possível de envio a partir de cenários com diferenças de mais de 50% no custo do envio, a depender dos trechos e modais escolhidos. O modal ferroviário apresentou poucas informações sobre custos de frete, por suas operações serem focadas no atendimento de grandes demandas, principalmente no envio de minérios. E, sendo praticamente nula a oferta para transporte de contêineres de carga geral, o que chama atenção para a oportunidade de seu desenvolvimento nesse meio.

Já para os cenários com distância entre origem e destino de mais de mil quilômetros, o modal aquaviário se destacou como diferencial para redução dos custos por apresentar reduções de mais de 50% se comparado à rota de maior custo.

Uma sugestão para trabalhos futuros é avaliar os envios rodoviários também com veículos porta-contêineres para que dessa forma possa ser analisado o envio de apenas uma carga entre a origem e o destino. No presente estudo foi possível igualar os volumes de envio em função da demanda da companhia, a adaptação foi realizada tendo em vista a maior parte da distribuição ocorrer via caminhões baú.

Assim, conclui-se que, a depender das restrições de cada aplicação, a utilização da programação dinâmica pode se tornar uma ferramenta útil para a escolha do modal de transporte de carga, para decidir qual modal de transporte (por exemplo, rodoviário, ferroviário, marítimo ou aéreo) deve ser selecionado para cada remessa de carga, levando em consideração diversos fatores, como custos, tempo de trânsito, capacidade, confiabilidade, restrições operacionais, entre outros.

A escolha da utilização de planilhas para implementação do modelo se deu por o caso em estudo apresentar pouca quantidade de estágios e de estados possíveis. Para problemas que possuam maior número de estágios e estados, tem-se o aumento da complexidade dos cálculos e se sugere utilizar linguagens de programação para facilitar a aplicação e obter variações de cenários de forma mais ágil.

Devido à sincromodalidade ser um termo criado recentemente, ainda poucos estudos são publicados no Brasil com este destaque. Porém, o crescimento do uso da multimodalidade no país incentiva o seu crescimento e, por consequência, o desenvolvimento e melhor uso de sua matriz de transportes.

REFERÊNCIAS

- ATUAL, Agência CNT Transporte. **Custo logístico consome 12,7% do PIB do Brasil**. 2016. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/custo-logistico-consome-12-do-pib-do-brasil>. Acesso em: 20 jan. 2023.
- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Logística Empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2006.
- BEHDANI, B.; FAN, Y.; WIEGMANS, B.; ZUIDWIJK, R. **Multimodal schedule design for synchromodal freight transport systems**. European Journal of Transport and Infrastructure Research, v. 16, n. 3, 2016. DOI: 10.18757/ejtir.2016.16.3.3151. Disponível em: <https://journals.open.tudelft.nl/ejtir/article/view/3151>. Acesso em: 18 jun. 2023.
- BELLMAN, R. E. and DREYFUS, S. E. **Applied Dynamic Programming**, Princeton: Princeton University Press, NJ, USA. 1962. <https://doi.org/10.1515/9781400874651>
- CAIXETA-FILHO, J. V.; MARTINS, R. S. **Gestão Logística do Transporte de Cargas**. São Paulo: Atlas, 2014. 298 p.
- CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS, 10., 2003, Guarapari. **Modelos Matemáticos para a Gestão de Custos e Resultados: Uma Aplicação da Programação Dinâmica**. Guarapari: Abc, 2003. 15 p.
- CHOPRA, S.; MEINDL, P. **Gestão da cadeia de suprimentos: estratégia, planejamento e operações**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011. 520 p.
- CHRISTOPHER, M. **Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos**. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 344 p.
- COLIN, E. C. **Pesquisa Operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2021. 508 p.
- DEFARES, D. **Exploration of future container transport to and from the Dutch hinterland: assessing the need for future policies**. 2011. 226 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Systems Engineering, Policy Analysis And Management, Delft University Of Technology, Delft, 2011.
- DIAS, M. A. **Logística, Transporte e Infraestrutura armazenagem, operador logístico, gestão via ti, multimodal**. São Paulo: Atlas, 2012. 360 p.
- FAN, Y. **The Design of a Synchromodal Freight Transport System: applying synchromodality to improve the performance of current intermodal freight transport system**. 2013. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engineering Transport, Infrastructure And Logistics, Delft University Of Technology, Delft, 2013.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 9. Ed. Porto Alegre: McGraw Hill Brasil, 2013. 1005 p.

- LAVALLE, C. **Sincromodalidade**: a integração inteligente de modais de transporte. a integração inteligente de modais de transporte. 2017. Disponível em: <https://www.ilos.com.br/sincromodalidade-a-integracao-inteligente-de-modais-de-transporte/>. Acesso em: 28 fev. 2023.
- LEITE, G. **Conversão em troncos em multiprodutos de madeira, utilizando programação dinâmica**. 1994. 230 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1993.
- MODER, J. J.; PHILLIPS, C. R.; DAVIS, E. W. **Project Management with CPM, PERT, and Precedence Diagramming**. Van Nostrand Reinhold, 1983.
- MEDHI, D.; RAMASAMY, K. **Network Routing: Algorithms, Protocols, and Architectures**. Morgan Kaufmann, 2007.
- NOVAES, A. **Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- PINEDO, M. **Planning and Scheduling in Manufacturing and Services**. Springer Science & Business Media, 2002.
- PINEDO, M. L. **Planning and Scheduling: in manufacturing and services**. 2. ed. New York: Springer Science & Business Media, 2009. 536 p.
- PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2. ed. Nova Hamburgo: Feevale, 2013. 277 p.
- RODRIGUES, P. R. A. **Introdução aos Sistemas de Transporte no Brasil e à Logística Internacional**. 4. ed. São Paulo: Edicoes Aduaneiras, 2007. 248 p.
- ROMANO, B. H. **Aplicação de um Método de Programação Dinâmica para Gestão de Estoques Utilizando um Algoritmo em Linguagem C++**. 2022. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Transportes e Logística, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022.
- SILVER, E.A., PYKE, D.F.; PETERSON, R. **Inventory Management and Production Planning and Scheduling**. 3. ed. John Wiley, New York. 1998.
- SIMCHI-LEVI, D.; KAMINSKY, P.; SIMCHI-LEVI, E. **Cadeia de suprimentos projeto e gestão: conceitos, estratégias e estudos de caso**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.
- VAN RIESSEN, B.; NEGENBORN, R.R.; DEKKER, R.; LODEWIJKS, G. **Service network design for an intermodal container network with flexible due dates/times and the possibility of using subcontracted transport**. Econometric Institute Research Papers EI2013-17, Erasmus University Rotterdam, Erasmus School of Economics (ESE), Econometric Institute. 2013.