

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CAMPUS DE SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Estudo do impacto da consideração de custos de emissão de CO_2 nas decisões de planejamento e roteamento de veículos de uma fábrica de móveis

Felipe Goulart Moraes

Sorocaba/SP
Dezembro de 2023

ESTUDO DO IMPACTO DA CONSIDERAÇÃO DE CUSTOS DE EMISSÃO DE CO_2 NAS
DECISÕES DE PLANEJAMENTO E ROTEAMENTO DE VEÍCULOS DE UMA FÁBRICA DE
MÓVEIS

Felipe Goulart Moraes

Orientadora: Deisemara Ferreira

Dissertação de Mestrado apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Sorocaba/SP

Dezembro de 2023

Goulart Moraes, Felipe

Estudo do impacto da consideração de custos de emissão de CO2 nas decisões de planejamento e roteamento de veículos de uma fábrica de móveis / Felipe Goulart Moraes -- 2023.
145f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba
Orientador (a): Deisemara Ferreira
Banca Examinadora: Maristela Oliveira dos Santos, Reinaldo Morabito Neto, Roberto Fernandes Tavares Neto, Douglas José Alem Junior
Bibliografia

1. Pollution Production Routing Problem; Indústria de Móveis; Otimização Linear Inteira Mista. I. Goulart Moraes, Felipe. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências em Gestão e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Felipe Goulart Moraes, realizada em 18/12/2023.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Deisemara Ferreira (UFSCar)

Prof. Dr. Maristela Oliveira dos Santos (USP)

Prof. Dr. Reinaldo Morabito Neto (UFSCar)

Prof. Dr. Roberto Fernandes Tavares Neto (UFSCar)

Prof. Dr. Douglas José Alem Junior (Edin)

Agradecimentos

Meus primeiros agradecimentos dedico a minha família, seu apoio e suporte foram fundamentais para o sucesso dessa jornada acadêmica. À minha mãe Wilza, por suas orações pedindo à Deus que me guiasse e, por todo amor e carinho que me acompanharam nesta trajetória. Ao meu pai Luiz por sempre ter incentivado os estudos e por seus sacrifícios e cuidados que deram condições à esta conquista. Estendo essa gratidão a todos familiares que de alguma forma durante toda minha trajetória me apoiaram, especialmente à minhas avós Cacilda e Maria, minha irmã Fernanda, meus tios Celso, Luciana e Juliana, que estiveram presentes todos estes anos.

À Profa. Dra. Deisemara Ferreira, expresso minha sincera gratidão pela orientação excepcional, por sua paciência e pelo conhecimento transmitido ao longo deste projeto. Sou grato pela oportunidade de aprender sob sua tutela e por todos ensinamentos recebidos. Eles foram essenciais para meu crescimento e aprendizado. Sua calma e equilíbrio foram primordiais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos, que me deram forças e mantiveram minha calma em momentos difíceis, em especial a Natália, Thiemi, Marina, Jonathan e Murilo, a presença de vocês trouxe leveza aos meus dias.

Ao João Paulo, meu gestor, que me incentivou a iniciar e realizar o mestrado e que acreditou mais em mim do que eu mesmo. Suas palavras de encorajamento foram fundamentais durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Faço também um agradecimento especial a família da Sueli, Valter e Cinthia que em 2013 foram a primeira casa da minha jornada acadêmica, carregou todo cuidado que vocês tiveram comigo no peito.

Cada membro da minha rede de apoio desempenhou um papel fundamental na realização deste trabalho, e este sucesso é verdadeiramente compartilhado. Agradeço a todos por acreditarem, me motivarem e tornarem esta jornada tão significativa.

À CAPES e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do campus de Sorocaba da UFSCar (PPGEP-So) pelo apoio, sem o qual esta pesquisa não teria sido possível. Agradeço também a todos os funcionários da UFSCar - Sorocaba que de alguma forma contribuíram para a elaboração deste trabalho. Em especial ao Felipe Marques, sempre solícito, eficiente e muito educado.

Resumo

Ao mesmo tempo em que é visto o cenário competitivo nas organizações, que procuram a maximização os lucros e satisfação do consumidor, também é visto preocupações mundiais a respeito do aumento da produtividade e seu impacto no meio ambiente, como na emissão de gases do efeito estufa com o gás carbônico (CO_2). Para auxiliar na tomada de decisão e alcançar a redução de custos econômicos e ambientais podem se adotar e implementar técnicas de modelagem e otimização linear inteira mista. Através destas técnicas atreladas esta dissertação visa estudar o problema integrado de planejamento da produção e roteamento de veículos considerando os impactos da redução da emissão de carbono em indústrias do ramo de móveis. A consideração da emissão de carbono é relacionada a emissão de combustível dos veículos, e aplicar esta visão é mais realista pois considera a carga transportada e velocidades dos veículos. Através de experimentos computacionais serão estudados os ganhos da consideração do descarregamento dos veículos, a seleção da velocidade que o veículo adota e o quanto a inclusão de custos de carbono decorrentes do roteamento podem afetar o *trade off* entre a produção e o roteamento dos veículos. Também foi desenvolvido um modelo adicional que considera uma frota heterogênea em relação ao seu potencial de emissão de CO_2 .

Palavras-chave: *Pollution Production Routing Problem*, Indústria de Móveis, Otimização Linear Inteira Mista

Abstract

At the same time that the competitive scenario is seen in organizations, which seek to maximize profits and consumer satisfaction, there are also global concerns about increasing productivity and its impact on the environment, such as the emission of greenhouse gases, mainly CO_2 . To assist in decision-making and achieve reduction of economic and environmental costs, linear modeling and optimization techniques can be adopted and implemented. Through these techniques this dissertation aims to study the problem of integrated production planning and vehicle routing considering the impacts of reducing carbon emissions in furniture industries. The consideration of carbon emissions is linked to vehicle fuel emissions and applying this view brings a more realistic scenario as it considers the load transported in vehicles and speeds. Through experiments will be analyzed the gains from considering the unloading of vehicles, the speed selection that the vehicle adopts and how much the inclusion of carbon costs can affect the *trade off* between production and routing. An additional model was also developed that considers a heterogeneous fleet in relation to CO_2 potential emission.

Keywords: Pollution Production Routing Problem, Furniture industry, Linear Optimization.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Gráfico com quantidade de publicações ao longo dos anos dos 188 artigos da revisão bibliográfica	9
Figura 2 – Categorização dos artigos em relação aos critérios de pesquisa: Selecionados e Não selecionados para a revisão	10
Figura 3 – Gráfico das formas de inserção de CO_2 nos modelos dos 50 artigos analisados	13
Figura 4 – Ilustração da correlação entre peso dos veículos e taxa de distância percorrida por litro de combustível	16
Figura 5 – Diagrama com classificação dos 50 artigos analisados em uma linha do tempo	19
Figura 6 – Relação entre velocidade e tempo para um cenário <i>time-dependent</i>	21
Figura 7 – Curva do custo de penalidade em função do descumprimento das janelas de tempo	28
Figura 8 – Fluxograma das etapas de produção e distribuição da indústria de móveis	33
Figura 9 – Relação entre componentes e produtos	35
Figura 10 – Ilustração do roteamento para o cenário proposto	36
Figura 11 – Exemplo da restrição de balanceamento de carga 3.31	48
Figura 12 – Instância 1: Rotas do modelo (a)LSMVRP-F2 e (b)CarbonLSMVRP	54
Figura 13 – Custos de <i>setup</i> , inventário e combustível + carbono para os modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP da instância 1	55
Figura 14 – Custos de <i>setup</i> , inventário e combustível + carbono para três as instâncias do experimento 1, modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP	56
Figura 15 – Exemplos de pesos reais de móveis	58
Figura 16 – Instância 4: Rotas do modelo (a)LSMVRP-F2 e (b)CarbonLSMVRP	59
Figura 17 – Custos de <i>setup</i> , inventário e combustível + carbono para os modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP da instância 4	59
Figura 18 – Custos de <i>setup</i> , inventário e combustível + carbono para as instâncias do experimento 2 com os modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP	61
Figura 19 – Mapa com distâncias entre depósito e clientes para os experimentos 3 e 4.	63
Figura 20 – Mapa com depósito, clientes, rotas para as instâncias 7A, 7B e 7C	65
Figura 21 – Custos de <i>setup</i> , inventário e combustível + carbono para as instâncias 7A, 7B e 7C.	66
Figura 22 – Custos de <i>setup</i> , inventário e combustível + carbono para as velocidades de 80km/h, 90km/h e 100km/h das instâncias do experimento 3.	67
Figura 23 – Mapa com depósito, clientes, rotas e velocidades para as instâncias 10A e 10B	71

Figura 24 – Custos de <i>setup</i> , inventário e combustível + carbono para as instâncias 10A e 10B	72
Figura 25 – Custos de <i>setup</i> , inventário e combustível + carbono para as velocidades de 80km/h e velocidade variável das instância do experimento 4	73
Figura 26 – Custos de <i>setup</i> , inventário, combustível e carbono para as instância 13A e 13B	76
Figura 27 – Diagrama com representação dos processos das instâncias 13A e 13B .	79
Figura 28 – Custos de <i>setup</i> , inventário, combustível e carbono para as instâncias do experimento 5	80
Figura 29 – Diagrama com representação dos processos das instâncias 14A e 14B .	82
Figura 30 – Mapas das rotas das instâncias 15B, 15C e 15D	89
Figura 31 – Rotas e veículos utilizados em cada rota para as instâncias 15B, 15C e 15D	90
Figura 32 – Custos de combustível e carbono para as instâncias 15B, 15C e 15D . .	91
Figura 33 – Mapas das rotas das instâncias 16B, 16C e 16D	93
Figura 34 – Rotas e veículos utilizados em cada rota para as instâncias 16B, 16C e 16D	94
Figura 35 – Custos de combustível e carbono para as instâncias 16B, 16C e 16D . .	95
Figura 36 – Emissão de Carbono por setor de 1990 até 2021 no Brasil (SEEG) . . .	109
Figura 37 – Valor do Crédito de Carbono Futuro de 2005 até 2023 na bolsa de valores	113

Lista de tabelas

Tabela 1	–	Etapas na realização da revisão sistemática da literatura	7
Tabela 2	–	Critérios e parâmetros de pesquisa aplicados na metodologia	9
Tabela 3	–	50 artigos selecionados para revisão bibliográfica - parte 1	11
Tabela 4	–	50 artigos selecionados para revisão bibliográfica - parte 2	12
Tabela 5	–	Parâmetros e variáveis do <i>Pollution Routing Problem</i>	15
Tabela 6	–	Características dos 50 artigos selecionados na revisão e esta revisão . .	31
Tabela 7	–	Conjuntos e Índices do modelo CarbonLSMVRP	38
Tabela 8	–	Parâmetros e variáveis do modelo CarbonLSMVRP	39
Tabela 9	–	Experimentos realizados com sua descrição e instâncias que são englobadas	50
Tabela 10	–	Dados fixos de todas instâncias ilustrativas	51
Tabela 11	–	Apresentação dos custos analisados nos experimentos computacionais .	53
Tabela 12	–	Dados particulares à instância 1	53
Tabela 13	–	Custos de roteamento de veículos dos modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP: Instância 1	55
Tabela 14	–	Custos de roteamento de veículos dos modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP: Instância 2	57
Tabela 15	–	Custos de roteamento de veículos dos modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP: Instância 3	57
Tabela 16	–	Tempo computacional para encontrar soluções do experimento 1	57
Tabela 17	–	Dados particulares à instância 4	58
Tabela 18	–	Custos de roteamento de veículos dos modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP com base na instância 4	60
Tabela 19	–	Custos de roteamento de veículos dos modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP com base na instância 5	61
Tabela 20	–	Custos de roteamento de veículos dos modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP com base na instância 6	62
Tabela 21	–	Tempo computacional para encontrar soluções do experimento 2	62
Tabela 22	–	Localização geográfica das cidades dos experimentos 3 e 4.	64
Tabela 23	–	Dados particulares à instâncias 7A, 7B e 7C	65
Tabela 24	–	Custos de roteamento de veículos do modelo CarbonLSMVRP para instâncias 7A, 7B e 7C	66
Tabela 25	–	Custos de roteamento de veículos do modelo CarbonLSMVRP para instâncias 8A, 8B e 8C	68
Tabela 26	–	Custos de roteamento de veículos do modelo CarbonLSMVRP para instâncias 9A, 9B e 9C	69
Tabela 27	–	Tempo computacional para encontrar soluções do experimento 3	69

Tabela 28 – Dados particulares das instâncias 10A e 10B	70
Tabela 29 – Custos de roteamento de veículos do modelo CarbonLSMVRP para as instâncias 10A e 10B	72
Tabela 30 – Custos de roteamento de veículos do modelo CarbonLSMVRP para as instâncias 11A e 11B	73
Tabela 31 – Custos de roteamento de veículos do modelo CarbonLSMVRP para as instâncias 12A e 12B	74
Tabela 32 – Tempo computacional para encontrar soluções do experimento 4	74
Tabela 33 – Dados particulares às instâncias 13A e 13B	75
Tabela 34 – Custos de combustível e carbono para as instâncias 13A e 13B	77
Tabela 35 – Custos de combustível e carbono para as instâncias 14A e 14B	81
Tabela 36 – Tempo computacional para encontrar soluções do experimento 5	83
Tabela 37 – Experimentos realizados com sua descrição e instâncias que são englobadas	84
Tabela 38 – Variáveis modificadas para o modelo HeF-CarbonLSMVRP	85
Tabela 39 – Parâmetros dos veículos de porte leve, médio e pesado	87
Tabela 40 – Dados particulares as instâncias 15A, 15B, 15C e 15D	88
Tabela 41 – Custos de roteamento de veículos para instâncias 15A, 15B, 15C e 15D	91
Tabela 42 – Custos de roteamento de veículos para instâncias 16A, 16B, 16C e 16D	95
Tabela 43 – Tempo computacional para encontrar soluções do experimento 6	96
Tabela 44 – Dados computacionais do experimento 1	115
Tabela 45 – Dados computacionais do experimento 2	115
Tabela 46 – Dados computacionais do experimento 3	115
Tabela 47 – Dados computacionais do experimento 4	115
Tabela 48 – Dados computacionais do experimento 5	116
Tabela 49 – Dimensão das instâncias	127
Tabela 50 – Quantidade de unidades de componentes para produzir uma unidade do produto - Conjunto de Instâncias 1, 4, 7, 10, 13, 15	127
Tabela 51 – Quantidade de unidades de componentes para produzir uma unidade do produto - Conjunto de Instâncias 2, 5, 8, 11, 14, 16	127
Tabela 52 – Quantidade de unidades de componentes para produzir uma unidade do produto- Conjunto de Instâncias 3, 6, 9, 12	128
Tabela 53 – Unidade de tempo para troca de produção dos componentes- Conjunto de Instâncias 1, 4, 7, 10, 13, 15	128
Tabela 54 – Unidade de tempo para troca de produção dos componentes - Conjunto de Instâncias 2, 5, 8, 11, 14, 16	128
Tabela 55 – Unidade de tempo para troca de produção dos componentes - Conjunto de Instâncias 3, 6, 9, 12	128
Tabela 56 – Demanda dos clientes pelos produtos - Conjunto de Instâncias 1, 4, 7, 10, 13, 15	129

Tabela 57 – Demanda dos clientes pelos produtos - Conjunto de Instâncias 2, 5, 8, 11, 14, 16	129
Tabela 58 – Demanda dos clientes pelos produtos - Conjunto de Instâncias 3, 6, 9, 12	129
Tabela 59 – Coordenadas - Conjunto de Instâncias 1, 4	130
Tabela 60 – Coordenadas - Conjunto de Instâncias 2, 5	130
Tabela 61 – Coordenadas - Conjunto de Instâncias 3, 6	130

Lista de abreviaturas e siglas

GEE: Gases do efeito estufa

GRP: Green Routing Problem

GWP: Global Warming Potential

LSP: Lot-Sizing Problem

LSMVRP: Lot-scheduling multi-vehicle routing problem

PO: Pesquisa Operacional

PRP: Production Routing Problem

PPRP: Pollution Production Routing Problem

VRP: Vehicle Routing Problem

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo	4
1.2	Justificativa	4
1.3	Metodologia	5
1.4	Organização do Trabalho	5
2	REVISÃO DA LITERATURA	7
2.1	Protocolo da Revisão Sistemática da Literatura segundo Tranfield (2003)	7
2.2	Categorização dos Artigos	9
2.3	Modelagem da Emissão de Carbono	12
2.3.1	Modelagem de de Bektas e Laporte (2011)	13
2.3.2	Modelagem de Xiao et al. (2012)	16
2.3.3	Modelos de Taxas de Emissão de Carbono	17
2.4	Descrição dos Modelos	18
2.5	Considerações sobre a revisão bibliográfica e potenciais de pesquisa	29
3	DESCRICHÃO DO PROBLEMA E MODELO PROPOSTO	32
3.1	Processos Produtivos na Indústria de Móveis	32
3.2	Descrição do Problema	37
3.3	Modelo CarbonLSMVRP	38
4	EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS	50
4.1	Dados utilizados	51
4.2	Consideração dos Custos de Carga no Roteamento dos Veículos: Experimentos 1 e 2	52
4.2.1	Experimento 1	53
4.2.2	Experimento 2	57
4.3	Escolha da Velocidade dos Veículos nas Rotas: Experimentos 3 e 4	63
4.3.1	Experimento 3	64
4.3.2	Experimento 4	70
4.4	Impacto da Adição dos Custos de Carbono no <i>Trade off</i> com a Produção: Experimento 5	75
5	FROTA HETEROGÊNEA EM RELAÇÃO A EMISSÃO DE CO_2	84

5.1	Modelo HeF-CarbonLSMVRP	84
5.2	Frota heterogênea em relação a emissão de CO_2 : Experimento 6	87
6	CONCLUSÕES E PESQUISAS FUTURAS	97
6.1	Conclusões	97
6.2	Pesquisas Futuras	98
	REFERÊNCIAS	100
	APÊNDICE A – CONTEXTUALIZAÇÃO SOBRE IMPACTOS DA EMIÇÃO DE CARBONO	108
A.1	Efeito Estufa e Aquecimento Global	108
A.2	Legislações e Tratados Internacionais	109
A.3	Mecanismos de Incentivo a Redução das Emissões dos GEE	111
A.3.1	Certificações de Neutralidade de CO_2 Equivalente (CO_2E)	111
A.3.2	Carbono Equivalente e Pegada de Carbono	112
A.3.3	Créditos de Carbono	113
	APÊNDICE B – DADOS COMPUTACIONAIS	115
	ANEXO A – MODELO CARBONLSMVRP	117
	ANEXO B – MODELO HEF-CARBONLSMVRP	120
	ANEXO C – MODELAGEM DE BETKAS E LAPORTE (2011)	123
	ANEXO D – MODELAGEM DE XIAO ET AL. (2012)	124
	ANEXO E – LSMVRP-F2 DE MIRANDA ET AL. (2019)	125
	ANEXO F – DADOS DAS INSTÂNCIAS	127
F.1	Quantidade de unidades de componentes para produzir uma unidade do produto	127
F.2	Unidade de tempo para troca de produção dos componentes	128
F.3	Demanda dos clientes pelos produtos	129
F.4	Coordenadas	130

1 INTRODUÇÃO

No atual panorama de competitividade encontrado nas empresas e organizações busca-se a otimização dos processos através da minimização dos custos, maximização dos lucros, melhoria nos níveis de serviços e aumento da satisfação dos consumidores (PORTER, 2000). Neste contexto, uma das áreas onde se reflete o bom gerenciamento e a implementação de processos mais sofisticados para alcançar performances mais efetivas, é na cadeia de suprimentos (FLYNN; HUO; ZHAO, 2010). Do inglês, *Supply chain*, a cadeia de suprimentos é definida como a integração entre as áreas que constroem a vida útil de um produto e engloba processos como a compra de materiais, produção industrial, armazenamento, distribuição e logística reversa (SEURING; MÜLLER, 2008).

Dentro das etapas da gestão da produção dentro da cadeia de suprimentos tem-se o planejamento da produção, que tem como atividade o planejamento da aquisição de materiais e o planejamento das atividades produtivas que coordenam a transformação dos materiais no produto final através de processos coordenados (POCHET; WOLSEY, 2006). Outra etapa essencial que compõe a cadeia de suprimentos é o planejamento da distribuição, composta por atividades como a decisão das rotas em que os veículos seguirão até os clientes (BENT RUSSELL W. VAN HENTENRYCK, 2004; NUORTIO et al., 2006). Para ambas as etapas uma ferramenta de apoio as decisões que visa alcançar o aumento na eficiência do planejamento de produção e distribuição é a pesquisa operacional (PO). Nos últimos anos o interesse das empresas por tecnologias baseadas em PO tem aumentado.

A pesquisa operacional se insere como uma ferramenta que auxilia as necessidades organizacionais e possibilita tanto a implementação de melhorias como a integração dos planejamentos na cadeia de suprimentos (BALDO et al., 2014; MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019). Alguns exemplos de oportunidades de otimização de decisões na cadeia de suprimentos são relacionados à programação da produção (KARIMI B. FATEMI GHOMI; WILSON, 2003), e ao roteamento dos veículos na distribuição dos produtos finais que impactam diretamente o financeiro das empresas (LAPORTE, 1992; PISINGER; ROPKE, 2007; SOLOMON, 1987).

A redução de custos financeiros que vem da melhoria destes processos é proveniente da otimização da quantidade de *setups* realizados, redução de inventário e redução de combustível gastos nas rotas percorridas. Diversos artigos mostram resultados positivos com a implementação destes métodos (ADULYASAK; CORDEAU; JANS, 2015; BALDO et al., 2014; MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019). Esses autores apontam que é possível através da utilização de modelos matemáticos e métodos de solução reduzir o custo das operações de produção e distribuição, refletindo na saúde financeira da organização.

Por exemplo, nos seguintes estudos após aplicação do PRP houve a redução de 15% (QIU et al., 2018), 21,73% (NEVES-MOREIRA et al., 2019), 12% (KUVVETLI; EROL, 2020) e 11,6% (DU; KONG; HU, 2019) nos custos operacionais das indústrias onde se teve aplicação da otimização.

Da mesma maneira como as organizações devem se importar com os custos financeiros, também devem se preocupar com os impactos ambientais. A produção e distribuição dos produtos pode gerar diversos impactos ao meio ambiente, como o uso da terra, a poluição sonora vinda dos maquinários, os resíduos que advém do uso da matéria prima e as emissões de gases de efeito estufa (GEE), sendo o principal o gás carbônico, CO_2 . Por isso, junto à redução de custos financeiros, o aspecto ambiental deve ser levado em conta durante a etapa de planejamento.

Os impactos da emissão excessiva do gás carbônico ao meio ambiente são diversos, e podem afetar ecossistemas devido a sua capacidade de aumentar acidez dos corpos aquáticos e ao seu potencial de desequilíbrio do efeito estufa, que se reflete no aumento da temperatura global, sendo esse último o principal impacto da emissão excessiva dos GEE no meio ambiente (PETERS, 1990). Os reflexos dessa variação da temperatura podem ser vistos em ondas de calor mais frequentes, que impactam em degelo de massas glaciais e aumento no nível do mar, eventos climáticos extremos com maior ocorrência e impacto no equilíbrio de diversos biomas que pode resultar em extinção de espécies (HOUGHTON, 2005; AL-GHUSSAIN, 2019).

Além do impacto diretamente no meio ambiente, a emissão de poluentes no ar também pode impactar na saúde humana, tanto de forma aguda como crônica. Um curto período de exposição, por exemplo, afeta principalmente o sistema respiratório causando irritação do nariz e da garganta, dispneia e inflamação do pulmão, e em casos mais sensíveis como em pessoas com lesões no pulmão ou asma, pode acarretar em impactos mais graves. Além do sistema respiratório há impactos no sistema cardiovascular, devido a redução de oxigênio na corrente sanguínea e também há diversos impactos no funcionamento dos órgãos e na coagulação do sangue (KAMPA; CASTANAS, 2008). Em uma exposição de longo prazo podem se ter impactos diversos em quem é exposto, que vão desde inflamações no corpo, mudança na composição do rim e da estrutura óssea, acidose respiratória, alterações comportamentais e fisiológicas e estresse oxidativo (JACOBSON et al., 2019).

Todos esses impactos levaram a uma preocupação de vários governos e que culminaram em leis, resoluções e acordos internacionais que fomentam a redução da emissão dos gases GEE. Na legislação brasileira é instituída uma Política Nacional sobre Mudança do Clima pela lei nº 12.187 de 29 de novembro de 2009, na resolução nº 491 de 19 de novembro de 2018 é disposto pelo CONAMA os padrões de qualidades do ar e no decreto nº 10.144 de 28 de novembro de 2019 é instituída a Comissão Nacional para Redução das Emissões de Gases de Efeito Estufa.

Em relação a acordos internacionais, há o Acordo de Paris (2015) que substituiu o Protocolo de Kyoto (1997), onde diversos países estabelecem metas para redução da emissão de carbono. No acordo de Paris o Brasil define como meta a redução da emissão de carbono de 37% de até 2025 e de 43% de até 2030 (SCHLEUSSNER et al., 2016).

A partir destes fóruns e acordos internacionais, além do desenvolvimento de legislações, também foram criados mecanismos como a certificação de empresas em relação a emissão dos GEE, e maneiras de precificar a emissão de carbono, representado pelos créditos de carbono.

Os créditos de carbono são unidades de medida utilizadas para quantificar a redução ou compensação de emissões dos GEE e são gerados por projetos que promovem a diminuição das emissões, como o uso de energias renováveis, reflorestamento, entre outros. O valor atual dos créditos de carbono em reais pode variar de acordo com o mercado e as políticas governamentais vigentes. Em 2023, o preço médio de um crédito de carbono tem sido aproximadamente de R\$60 a R\$120 por tonelada de CO₂ equivalente, podendo sofrer variações ao longo do tempo conforme as políticas ambientais evoluem (POYER et al., 2020; ANDRADE; COSTA, 2008; MICHAELOWA; SHISHLOV; BRESCIA, 2019).

A partir das preocupações com a redução das emissões do CO₂, mas principalmente a partir das penalizações e precificação das emissões de gás carbônico, começou a haver uma preocupação das empresas sobre suas emissões de CO₂. Mais detalhamento sobre essas legislações, acordos internacionais e mecanismos para fomentar a redução da emissão de CO₂ equivalente e seu cálculo baseado nos outros GEE estão detalhados no apêndice A.

A emissão do CO₂ pode vir de diversas etapas no processo produtivo, seja na produção, através da emissão pelos maquinários ao realizar gasto de energia, ou no roteamento de veículos, pela queima de combustível. Para auxiliar na redução dessas emissões, surge o *Pollution Routing Problem*, modelo de otimização linear inteira mista que visa minimizar a emissão de carbono no roteamento de veículos considerando aspectos como a distância, a carga carregada e a velocidade tomada pelo veículo (BEKTAŞ; LAPORTE, 2011). Neste trabalho é mostrado que quanto mais pesada é a carga do veículo mais o motor é forçado e como consequência mais combustível é gasto e CO₂ é emitido. No caso das rotas quanto mais longas as rotas, mais combustível é gasto, e além disso, dependendo do horário que a entrega deve ocorrer (janelas de tempo) mais velocidade é necessária e ocorre mais emissão (BARTH; YOUNGLOVE; SCORA, 2005). Esses modelos que abordam a redução de carbono na otimização linear inteira mista serão apresentados com mais detalhe no capítulo 2, na revisão bibliográfica.

Nesse sentido, empresas que possuem caminhões pesados e rotas longas podem se beneficiar desses estudos. Esse é o caso do setor moveleiro, isso porque em empresas que atendem o território nacional, a parte de distribuição envolve rotas longas. Outro ponto que é importante e que influencia na emissão é o peso dos produtos, que pode ser alto

pela sua composição, como o aço. (MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019).

Até onde tomamos conhecimento na literatura científica o problema integrado de planejamento da produção e roteamento de veículo no setor de móveis considerando o impacto da emissão de carbono ainda não foi abordado. Na presente dissertação, pretende-se estudar esse problema.

1.1 Objetivo

Tendo em vista tanto a necessidade das organizações de minimização de custos financeiros, quanto os impactos das atividades industriais no meio ambiente, este trabalho tem como objetivo estudar o problema integrado do planejamento da produção e do roteamento de veículos na indústria de móveis considerando o aspecto ambiental através da redução da emissão de carbono na etapa de distribuição.

Para realização deste estudo são propostos modelos de otimização linear inteira mista na representação e solução do problema. Embora o carbono possa ser minimizado em toda a cadeia de suprimentos, nesta dissertação a redução da emissão de carbono será realizada na parte de roteamento. O foco atribuído a redução do carbono na etapa de roteamento se dá devido ao alto impacto que a distribuição tem no problema e especificamente para a indústria de móveis de aço.

De maneira específica, para avaliar o impacto da inclusão da minimização das emissões de CO_2 nas decisões de roteamento de veículos são incluídos no modelo matemático termos que representam diferentes fatores que influenciam nas emissões, são elas: peso do veículo carregado, velocidade e distância percorrida. Foram realizados diferentes experimentos computacionais considerando esses fatores e avaliando sua influência, em termos de emissão de carbono, nas decisões de roteamento.

Além disso, na literatura relacionada a frota de veículos era considerada heterogênea apenas em termos de capacidade dos caminhões. Porém, tendo em vista que novas tecnologias de veículos podem afetar as taxas de emissão de carbono, propomos na presente dissertação uma extensão do modelo de otimização que considera a frota heterogênea variando também pelas características do caminhão.

1.2 Justificativa

Devido aos impactos ambientais e sociais da emissão de carbono, com a alteração do equilíbrio de ecossistemas, ondas de calor, impacto na saúde humana tanto de forma aguda como crônica, atrelado ao impacto financeiro dos custos de combustível e de carbono, e também a demanda mundial, que é traduzida por legislações e acordos internacionais,

justifica-se a importância de pesquisas científicas que tratem as etapas da cadeia de suprimentos levando em conta esses fatores ambientais.

Uma das técnicas que contribuem de maneira efetiva nessas pesquisas é a utilização de modelos de otimização linear inteira mista. Sendo assim, na presente dissertação propomos modelos de otimização para o estudo da programação da produção e roteamento de veículos da indústria de móveis de aço. Esse problema é relevante pois as cargas transportadas são cargas pesadas e, as rotas são longas, que são fatores que afetam a emissão de CO_2 .

No apêndice A, incluídos uma revisão sobre a importância da consideração das emissões de CO_2 no planejamento da produção e do roteamento de veículos. Vemos que, além dos fatores ambientais o comércio e legislação de créditos de carbono é uma realidade que já tem onerado e impactado as empresas. Tanto do ponto de vista da imagem da empresa quanto à adequação à novas legislações e normas ambientais. Nesse sentido, a presente pesquisa contribui também para a adequação às normas ambientais e competitividade das empresas.

1.3 Metodologia

Segundo a classificação de Gil (2008) podemos definir essa dissertação como quantitativa, por se tratar da definição de um modelo matemático junto com sua resolução baseada em quantificações; uma pesquisa aplicada, por se tratar da aplicação prática na resolução de um problema específico e de natureza explicativa pois define um problema existente e o descreve. Em relação ao delineamento da pesquisa há componentes de pesquisa experimental, pela definição da análise de variáveis e impactos em um modelo matemático, uma vez que é utilizado um caso prático .

Segundo a classificação de Morabito e Pureza (2010) essa dissertação por ser quantitativa também pode ser definida como axiomática, por ser direcionada por modelos que visam refletir a realidade e após a definição do modelo é objetivada sua solução a fim de resolver um problema, também é normativa pois não só descreve um comportamento, mas também auxilia na tomada de decisão e procura uma solução ótima para o problema estudado.

1.4 Organização do Trabalho

O presente trabalho se segue organizado da seguinte forma:

No Capítulo 2 é construída a revisão da literatura, abordando o problema do planejamento da produção e distribuição de forma integrada com redução da emissão de carbono. A revisão visa caracterizar os modelos que tratam deste problema, buscar lacunas

científicas que se relacionem ao objetivo deste estudo e também fazer um levantamento dos dados disponíveis para o problema do PPRP e os dados sobre emissões de CO_2 .

Após a revisão dos modelos que visam a inserção do carbono, no Capítulo 3 é apresentado o processo produtivo nas indústrias de móveis, é feita também a definição do problema e a proposta do modelo definido nesta dissertação.

No Capítulo 4 são apresentadas a geração das instâncias baseadas em dados realistas que representam os diferentes cenários e também os experimentos computacionais realizados.

No Capítulo 5 é apresentado uma nova proposta de modelo, adicionando uma frota heterogênea em relação a emissão de CO_2 , além do modelo no capítulo há experimentos que comprovam os ganhos de se considerar uma frota heterogênea.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho e quais as pesquisas futuros que podem ser realizadas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A preocupação com o excesso de emissões de carbono tem sido um tema cada vez mais relevante, e a literatura científica que aborda esse assunto tem se desenvolvido cada dia mais. Um dos setores que têm se preocupado em diminuir as emissões de CO_2 é o setor industrial. Nele há diferentes momentos na cadeia de suprimentos onde as emissões podem ser reduzidas, um deles é no roteamento dos veículos de entrega das demandas

Neste capítulo é apresentada a revisão sistemática da literatura científica relacionada, que tem como objetivo realizar uma análise sobre os modelos matemáticos que modelam o roteamento de veículos considerando a redução da emissão de CO_2 .

2.1 Protocolo da Revisão Sistemática da Literatura segundo Tranfield (2003)

Esta revisão tem natureza descritiva, uma vez que se baseia em técnica padronizada para coleta de dados das formas utilizadas na consideração do carbono nos modelos integrados de roteamento de veículos. A metodologia aplicada neste capítulo é a revisão sistemática da literatura baseada na definição feita por Tranfield et al. (2003) (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003) e para sua execução o método de pesquisa definido foi dividido em 5 etapas, descritas na tabela 1.

Tabela 1 – Etapas na realização da revisão sistemática da literatura

Etapa	Descrição da etapa
1	Planejamento e definição dos objetivos da pesquisa e delimitação das áreas interesse.
2	Identificação dos artigos através de palavras e termos chave para identificar as literaturas que tratam da inserção do carbono no planejamento da produção e do roteamento.
3	Avaliação da qualidade dos estudos selecionados na etapa 2, conforme os critérios definidos.
4	Extração dos dados que respondem à pergunta objetivo deste estudo.
5	Síntese dos dados extraídos na etapa anterior, de modo a proporcionar uma base para resultados e discussão.

Etapa 1

Em relação a Etapa 1, que é o planejamento e definição dos objetivos, foram elencadas questões direcionadoras da pesquisa em desenvolvimento que definem quais informações serão coletadas, são elas:

- Quais as formas utilizadas para a consideração do carbono nos problemas de roteamento de veículos? Como a emissão de carbono é considerada nestes modelos?
- Há problemas que integram produção, roteamento e redução das emissões de carbono?

- Quais são as principais características de cada modelo?

Etapa 2

Para a Etapa 2, os termos chave de pesquisa foram:

- “*Pollution Routing Problem*”: para procurar problemas gerais que tratem a inclusão do carbono nos problemas de roteamento.
- “*Pollution Inventory Routing Problem*”, “*Pollution Production Routing Problem*”: para procurar problemas que tratem da integração da produção no problema.
- “*Routing Problem*”, “*Carbon Emission*”, “*Model*” e “*Minimize*”, para aprofundar a pesquisa.

Esses termos de pesquisa foram inseridos nas bases de dados *Scopus*, com pesquisa no título do artigo, resumo e palavras-chave da forma como se escrevem e na *Web of Science* tendo em vista que é uma das principais base foi buscado na pesquisa em todo o texto dos artigos.

Etapa 3

Foram definidos os seguintes critérios de pesquisa: sem delimitação do período inicial de pesquisa definido, e período final limitado a maio de 2023. Os critérios de inclusão foram artigos em inglês que atendam os critérios de pesquisa anteriormente citados. Os critérios de exclusão foram artigos que: definam um modelo de roteamento de veículos que considere a redução de emissão de carbono e onde roteamento seja feito por veículos terrestres (que são o modo de transporte da indústria de móveis deste estudo). Também foram desconsiderados modelos que não tratam de otimização linear inteira mista. Na tabela 2 estão apresentados os parâmetros do planejamento de forma resumida, que se referem as etapas 2 e 3 desta revisão.

Tabela 2 – Critérios e parâmetros de pesquisa aplicados na metodologia

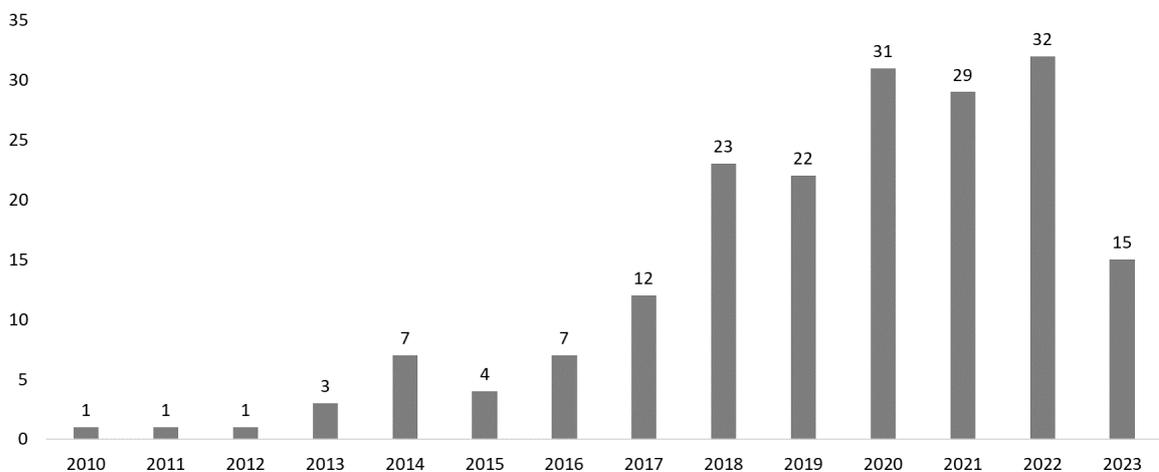
Parâmetros da revisão	Descrição
1. Questão direcionadora	Como é considerado o carbono nos modelos? Há problemas que integram produção, roteamento e redução das emissões de carbono? Há aplicações em ramos industriais específicos? Quais são os modelos utilizados?
2. Conceitos Extraídos	Considerando as restrições utilizadas e suas características principais. Fórmula de inserção do carbono nos modelos de otimização; Termos de minimização nas funções objetivo;
3. Período da pesquisa	Restrições presentes no modelo; Frota heterogênea ou frota homogênea;
4. Local de Pesquisa	Características principais dos modelos.
5. Termos adaptados	Sem limitação inicial até maio/23 Web of Science (todos os termos) e Scopus (título, artigo e palavras-chave) "Pollution Routing Problem" "Pollution Inventory Routing Problem" "Pollution Production Routing Problem" "Routing Problem", "Carbon Emission", "Model" e "Minimize"
6. Critérios de Inclusão	Artigos em inglês que atendam aos parâmetros 1 a 5. Artigos que não realizem a definição de modelos de roteamento de veículos com inclusão da redução da emissão de carbono na função objetivo;
7. Critérios de Exclusão	Artigos em que o roteamento de veículos é feito com veículos terrestres; Artigos com função multiobjetivo; Artigos com modelos que não sejam de otimização linear inteira.

2.2 Categorização dos Artigos

Etapa 4

No total aplicando os parâmetros de pesquisa da tabela 2 foram encontrados 188 artigos. Na figura 1 eles estão apresentados em quantidade por ano de publicação. Observa-se pelo gráfico uma tendência de crescimento ao longo dos anos, principalmente a partir de 2017, quando há um salto para de 12 para 23 artigos comparando com 2018. Ressaltamos que 2023 só contem artigos publicados até maio.

Figura 1 – Gráfico com quantidade de publicações ao longo dos anos dos 188 artigos da revisão bibliográfica



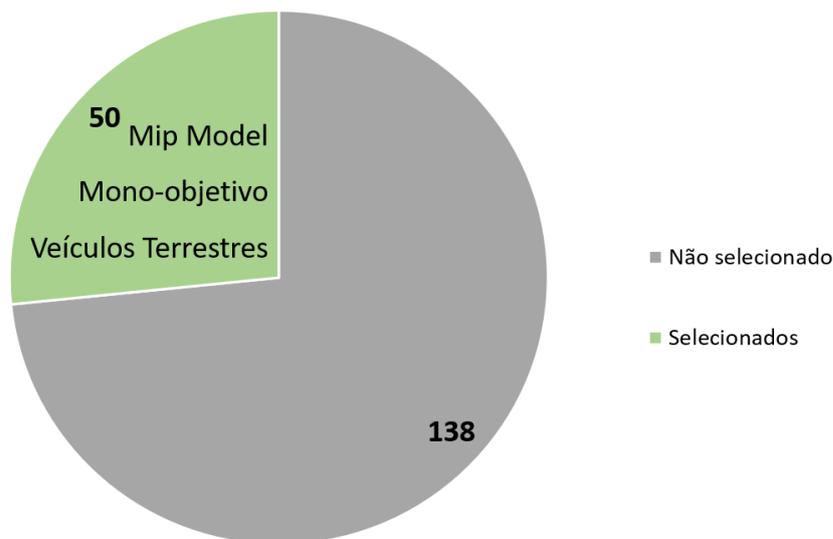
Fonte: Autoria própria.

Após a obtenção dos 188 artigos foi realizada a primeira classificação dos artigos em relação aos critérios de inclusão e exclusão. Nesta classificação, foram divididos em grupos:

- Selecionados: artigos com inclusão de modelagem de redução de emissão de CO_2 em um modelo matemático de otimização linear inteira mista com função mono-objetivo.
- Não selecionados para a revisão: artigos que não se aplicam aos critérios de inclusão/exclusão.

Na figura 2 estão apresentados grupos citamos acima. Dos 188 artigos, 50 foram selecionados para a revisão, por se incluírem nos critérios de pesquisa e serem mono-objetivo e 138 não serão incluídos na revisão por não se adequarem aos critérios de pesquisa. Embora os 138 artigos não sejam de interesse vale observar que 50 artigos não foram selecionados por possuir função multiobjetivo, estes artigos podem ser uma possibilidade de pesquisas futuras.

Figura 2 – Categorização dos artigos em relação aos critérios de pesquisa: Selecionados e Não selecionados para a revisão



Fonte: Autoria própria.

Nas tabelas 3 e 4 estão apresentados os 50 artigos. Na primeira coluna há um número de identificação, na segunda coluna as referências organizadas em ordem cronológica.

Tabela 3 – 50 artigos selecionados para revisão bibliográfica - parte 1

Referência	Nome Artigo
(BEKTAŞ; LAPORTE, 2011)	The Pollution-Routing Problem
(DEMIR; BEKTAŞ; LAPORTE, 2012)	2An adaptive large neighborhood search heuristic for the Pollution-Routing Problem
(FRANCESCHETTI et al., 2013)	The time-dependent pollution-routing problem
(TAJIK et al., 2014)	A robust optimization approach for pollution routing problem with pickup and delivery under uncertainty
(KOÇ et al., 2014)	The fleet size and mix pollution-routing problem
(LIU et al., 2014)	Minimizing the Carbon Footprint for the Time-Dependent Heterogeneous-Fleet Vehicle Routing Problem with Alternative Paths
(QIU; QIAO; PARDA-LOS, 2017)	A branch-and-price algorithm for production routing problems with carbon cap-and-trade
(YAVUZ; ÇAPAR, 2017)	Alternative-Fuel Vehicle Adoption in Service Fleets: Impact Evaluation Through Optimization Modeling
(LIAO, 2017)	On-Line Vehicle Routing Problems for Carbon Emissions Reduction
(ZHANG et al., 2017)	A multimodal logistics service network design with time windows and environmental concerns
(MAJIDI; HOSSEINI-MOTLAGH; IGNA-TIUS, 2018)	Adaptive large neighborhood search heuristic for pollution-routing problem with simultaneous pickup and delivery
(SOYSAL; ÇIMEN; DEMIR, 2018)	On the mathematical modeling of green one-to-one pickup and delivery problem with road segmentation
(BALAMURUGAN et al., 2018)	OPTIMIZATION OF INVENTORY ROUTING PROBLEM TO MINIMIZE CARBON DIOXIDE EMISSION
(MICHELI; MANTELLA, 2018)	Modelling an environmentally-extended inventory routing problem with demand uncertainty and a heterogeneous fleet under carbon control policies
(LI; WANG; ZHANG, 2018)	Heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem based on fuel and carbon emissions
(LEE et al., 2018)	An Integrated Approach for Sustainable Supply Chain Management with Replenishment, Transportation, and Production Decisions
(TAN et al., 2019)	The capacitated pollution routing problem with pickup and delivery in the last mile
(DUKKANCI; KARA; BEKTAŞ, 2019)	The green location-routing problem
(LI; YANG; QIN, 2019)	Optimization of Integrated Inventory Routing Problem for Cold Chain Logistics Considering Carbon Footprint and Carbon Regulations
(LIAO; LIU; FU, 2019)	A Comparative Study on the Routing Problem of Electric and Fuel Vehicles Considering Carbon Trading
(CHEN et al., 2019)	Optimization of Transportation Routing Problem for Fresh Food by Improved Ant Colony Algorithm Based on Tabu Search
(QIN; TAO; LI, 2019)	A Vehicle Routing Optimization Problem for Cold Chain Logistics Considering Customer Satisfaction and Carbon Emissions
(QIU et al., 2020)	Carbon pricing initiatives-based bi-level pollution routing problem
(LIU et al., 2020b)	Vehicle routing problem in cold Chain logistics: A joint distribution model with carbon trading mechanisms
(QIAO et al., 2020)	Optimization of a Capacitated Vehicle Routing Problem for Sustainable Municipal Solid Waste Collection Management Using the PSO-TS Algorithm
(LIU et al., 2020a)	Time-dependent vehicle routing problem with time windows of city logistics with a congestion avoidance approach
(WANG; WEN, 2020)	Optimization of a Low-Carbon Two-Echelon Heterogeneous-Fleet Vehicle Routing for Cold Chain Logistics under Mixed Time Window
(BABAGOLZADEH et al., 2020)	Sustainable cold supply chain management under demand uncertainty and carbon tax regulation
(SARBIJAN; BEHNA-MIAN, 2020)	Multi-product production routing problem by consideration of outsourcing and carbon emissions: particle swarm optimization
(WU; WU, 2021)	TDGVRPSTW of Fresh Agricultural Products Distribution: Considering Both Economic Cost and Environmental Cost
(LUO; DRIDI; GRUN-DER, 2021)	An ACO-based heuristic approach for a route and speed optimization problem in home health care with synchronized visits and carbon emissions
(ZHU; FU; LI, 2021)	Optimization Research on Vehicle Routing for Fresh Agricultural Products Based on the Investment of Freshness-Keeping Cost in the Distribution Process
(ISLAM; GAJPAL; EL-MEKKAWY, 2021)	Mixed fleet based green clustered logistics problem under carbon emission cap
(JIA et al., 2021)	The Bike-Sharing Rebalancing Problem Considering Multi-Energy Mixed Fleets and Traffic Restrictions

Tabela 4 – 50 artigos selecionados para revisão bibliográfica - parte 2

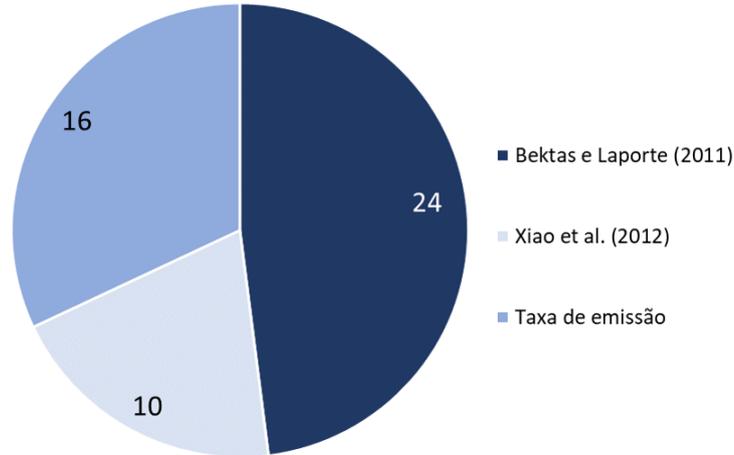
Referência	Nome Artigo
(KANG; LEE; YEH, 2021)	An optimization approach for traveling purchaser problem with environmental impact of transportation cost
(FERREIRA; QUEIROZ; TOLEDO, 2021)	An exact approach for the green vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints and split delivery
(QUAN et al., 2022)	Open pollution routing problem of logistics distribution in medical union based on differential search algorithm
(YAO; ZHU; LI, 2022)	Green Vehicle-Routing Problem of Fresh Agricultural Products Considering Carbon Emission
(YAO et al., 2022)	Research on Urban Distribution Routes Considering the Impact of Vehicle Speed on Carbon Emissions
(WU et al., 2022)	A New Route Optimization Approach of Fresh Agricultural Logistics Distribution
(KUMAR et al., 2022)	Inventory routing model for perishable products toward circular economy
(ZHENG; QIN; ZHANG, 2022)	Design an Effective Blood Distribution Network with Minimal Impacts on the Environment and Blood Supply Assurance
(ALP; TAN; UDENIO, 2022)	Transitioning to sustainable freight transportation by integrating fleet replacement and charging infrastructure decisions
(LIU; CHEN; QIN, 2022)	The pollution-routing problem with one general period of congestion
(ZHOU; LIU; XU, 2022)	Time-Dependent Green Location-Routing Problem under Carbon Cap-and-Trade Policy
(ZHANG et al., 2022)	A low-carbon, fixed-tour scheduling problem with time windows in a time-dependent traffic environment
(KABADURMUS; ERDOGAN, 2023)	A green vehicle routing problem with multi-depot, multi-tour, heterogeneous fleet and split deliveries: a mathematical model and heuristic approach
(REN et al., 2023)	Improved ant colony optimization for the vehicle routing problem with split pickup and split delivery
(SUN et al., 2023)	Trade-offs between economic and environmental goals of production-inventory-routing problem for multiple perishable products
(MOGALE et al., 2023)	Designing a sustainable freight transportation network with cross-docks

2.3 Modelagem da Emissão de Carbono

Esta seção tem como objetivo retratar as formas de se considerar a redução das emissões carbono nos modelos matemáticos. Para isso foram levantadas três formas de modelagem. A primeira forma foi introduzida no modelo de (BEKTAŞ; LAPORTE, 2011), com base na formulação definida por (BARTH; YOUNGLOVE; SCORA, 2005) para gasto de combustível. A segunda forma de modelagem é com base no trabalho de (XIAO et al., 2012), que utilizou dados empíricos para relacionar a carga carregada dos veículos à emissão de carbono. E por fim a terceira forma é a utilização de uma taxa de emissão de carbono, que pode variar ou não em uma frota heterogênea.

Na figura 3 temos um gráfico que apresenta a classificação dos 50 artigos da revisão bibliográfica, utilizando como critério a forma de modelagem de inserção da minimização da emissão de carbono. As próximas 3 subseções seguintes detalham cada uma delas.

Figura 3 – Gráfico das formas de inserção de CO_2 nos modelo dos 50 artigos analisados



Fonte: Autoria própria.

2.3.1 Modelagem de de Bektas e Laporte (2011)

No estudo de (BARTH; YOUNGLOVE; SCORA, 2005), através da fórmula 2.1 é definida uma formulação que relaciona o gasto de combustível de um veículo à suas características físicas, a potência gerada pelo veículo e as características do ambiente no qual ele se situa.

$$F = (\bar{k}\bar{N}\bar{V} + (P_t/\varepsilon + P_a)\bar{\eta})U \quad (2.1)$$

onde, F é a taxa de uso de combustível, \bar{k} é o fator de atrito do motor, \bar{N} é a velocidade do motor, \bar{V} é o deslocamento do motor, P_t é a demanda total de potência de tração watts ($W = kgm^2/s^3$) colocado no veículo, ε é a eficiência do trem de força do veículo, P_a é a demanda de potência do motor associados a perdas de funcionamento do motor e acessórios adicionais do veículo (Watts), $\bar{\eta}$ é uma medida de eficiência para motores a diesel, e U é um valor que depende de algumas constantes, incluindo \bar{N} .

A fórmula 2.1 ao ser aplicada em um modelo traduz a potência gasta em duas variáveis que impactam no consumo de combustível, sendo elas a velocidade e a carga aplicada ao veículo. Os outros fatores, por motivos práticos, não são considerados como variáveis do modelo, mas sim como constantes parâmetros fixos dos veículos, a partir da fórmula 2.1 desenvolveu-se a fórmula 2.2 que mensura a energia consumida em um arco (i, j) .

$$P_{i,j} \approx \bar{\alpha}_{ij}(\bar{w} + f_{i,j})\bar{d}_{ij} + \bar{\beta}\bar{v}_{ij}^2\bar{d}_{ij} \quad (2.2)$$

Nesta fórmula 2.2, $P_{i,j}$, é o total de energia aproximado consumido em um arco i, j , onde $\bar{\alpha}_{ij} = \bar{r} + \bar{g}\sin\bar{\theta}_{ij} + \bar{g}C_r\cos\bar{\theta}_{ij}$ é uma constante específica do arco, indicando a inclinação da superfície, e $\bar{\beta} = 0,5C_d\bar{A}\rho_{ar}$ é uma constante do veículo. Esta potência é medida em joules, que podem ser transformados diretamente em consumo de combustível e, portanto, relacionados a emissão dos GEE. Na fórmula 2.2, também aparece o peso do

veículo, representado por \bar{w} , a distância percorrida dada por \bar{d}_{ij} , a carga representada por f_{ij} e a velocidade \bar{v}_{ij} .

A fórmula 2.1 permite que a emissão de carbono seja calculada a partir do gasto de combustível, e esta relação feita inicialmente por (BARTH; YOUNGLOVE; SCORA, 2005) foi reformulada por (BEKTAŞ; LAPORTE, 2011) ao definir o *Pollution Routing Problem*.

A partir da fórmula 2.2 (BEKTAŞ; LAPORTE, 2011) definiram a primeira função objetivo que visa minimizar a redução da emissão de carbono, atrelada ao gasto de combustível, apresentada na fórmula 2.3. Nesta função, w_{ij} é uma variável binária igual a 1 se o veículo atravessa o arco $(i, j) \in A$. A variável f_{ij} é a carga que o veículo carrega durante o trajeto de i para j . A variável l_{ij}^{vel} é a variável binária que é igual a 1 caso uma determinada velocidade v seja selecionada para percorrer um arco (i, j) . É importante considerar que neste modelo a velocidade é um parâmetro dentro de um conjunto de Velocidades VEL , que é selecionado por uma variável binária auxiliar l_{ij}^{vel} .

A função 2.3 é a função objetivo, onde nos três primeiros termos é minimizado o custo do gasto de combustível e seu impacto na emissão de carbono. No primeiro termo os custos são relacionados a distância percorrida, no segundo termo ao impacto da carga do veículo na emissão e no terceiro termo o impacto da velocidade na emissão. O quarto termo aborda o custo de mão de obra, representado pelo custo do motorista por tempo de trabalho (p_d) multiplicado pelas variável horas de trabalho \bar{s}_j . Vale ressaltar que os três primeiros termos mensuram o consumo em litros de combustível, e este é transformado em valor financeiro através da relação dada pelos preços de combustível e do carbono ($p_f + \bar{e}p_c$).

$$\begin{aligned}
\min \quad & \underbrace{(p_f + \bar{e}p_c)}_{\text{Custos Combustível e Carbono}} \left(\underbrace{\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \alpha_{ij} \bar{d}_{ij} \bar{w} w_{ij}}_{\text{Peso do Veículo}} + \underbrace{\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\alpha}_{ij} \bar{d}_{ij} f_{ij}}_{\text{Carga}} \right) + \\
& \underbrace{\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{d}_{ij} \bar{\beta} \left(\sum_{vel=1}^{VEL} (\bar{v}^{vel}) l_{ij}^{vel} \right)}_{\text{Resistência do Ar}} + \underbrace{\sum_{j \in N} p_d \bar{s}_j}_{\text{Mão de Obra}}
\end{aligned} \tag{2.3}$$

A partir da fórmula, 2.2, (DEMIR; BEKTAŞ; LAPORTE, 2012) descreve uma função objetivo que aprimora a função objetivo descrita pela fórmula 2.3. Através da utilização de mais parâmetros característicos ao veículo que detalham melhor a emissão de combustível. Esta nova função objetivo esta apresentada na fórmula 2.4. Não há mudança de variáveis em relação á fórmula 2.3. Neste caso iremos desconsiderar os custos de mão de obra.

$$\begin{aligned}
\min \quad & \underbrace{(p_f + \bar{e}p_c)}_{\text{Taxas Dos Custos}} \left(\underbrace{\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{k} \bar{N} \bar{V} \bar{d}_{ij}}_{\text{Resistência Motor}} \sum_{vel=1}^{VEL} l_{ij}^{vel} / \bar{v}^{vel} + \underbrace{\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{\gamma} \bar{w} \bar{\alpha}_{ij} \bar{d}_{ij} w_{ij}}_{\text{Peso Veículo}} \right) \\
& + \underbrace{\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{\gamma} \bar{\alpha}_{ij} \bar{d}_{ij} f_{ij}}_{\text{Carga}} + \underbrace{\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{\gamma} \beta \bar{d}_{ij}}_{\text{Resistência Do Ar}} \sum_{vel=1}^{VEL} l_{ij}^{vel} (\bar{v}^{vel})^2
\end{aligned} \tag{2.4}$$

Os novos parâmetros adicionados à formula 2.4 estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros e variáveis do *Pollution Routing Problem*

Parâmetro	
\bar{N}	Velocidade do motor do veículo.
\bar{k}	Fator de fricção do motor do veículo.
\bar{V}	Deslocamento do motor do veículo.
$\bar{\lambda}$	Função = $\xi / \kappa \psi$
ξ	Relação de massa de combustível-ar.
κ	Valor de aquecimento de um combustível diesel típico.
ψ	Fator de conversão de gramas para litros.
$\bar{\gamma}$	Função = $1 / 1000 \varepsilon \varpi$
ε	Eficiência do trem de força do veículo.
ϖ	Parâmetro de eficiência para motores a diesel de um veículo.

Os quatro termos da função objetivo 2.4 calculam a quantidade de litros de combustível gastos, sendo:

- 1º termo ($\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{k} \bar{N} \bar{V} \bar{d}_{ij} \sum_{vel=1}^{VEL} l_{ij}^{vel} / \bar{v}^{vel}$): refere-se ao gasto de combustível que decorre da velocidade e seu impacto na resistência do motor.
- 2º termo ($\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{\gamma} \bar{w} \bar{\alpha}_{ij} \bar{d}_{ij} w_{ij}$): refere-se ao gasto de combustível decorrente da distância percorrida e é impactado pelo ângulo de elevação do terreno e o peso do veículo.
- 3º termo ($\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{\gamma} \bar{\alpha}_{ij} \bar{d}_{ij} f_{ij}$): é diretamente relacionado a carga adicional sobre o veículo que esta sendo transportada, também relaciona-se ao angulo de elevação do terreno e a distância.
- 4º termo ($\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{\gamma} \beta \bar{d}_{ij} \sum_{vel=1}^{VEL} l_{ij}^{vel} (\bar{v}^{vel})^2$): relacionado ao gasto que vem da velocidade, a resistência do ar e a área frontal do caminhão.

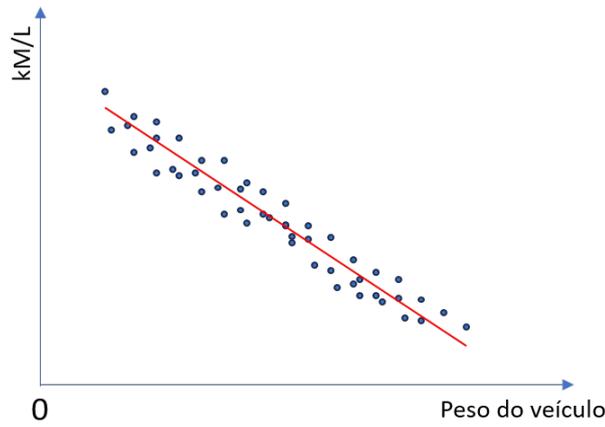
Para fins de classificação, iremos denominar essa categoria de modelagem de emissão de carbono como **Modelagem de Bektas e Laporte (2011)**. O modelo completo com as restrições que garantem o funcionamento da função objetivo está apresentado no anexo C.

2.3.2 Modelagem de Xiao et al. (2012)

A definição de inserção do carbono realizada por (XIAO et al., 2012) também é relacionada ao consumo de combustível de um veículo. Este consumo é denominado pelo autor como *Fuel Consumption Rate* (FCR), isto é, a taxa de consumo de combustível.

Com base em estudos empíricos foi verificada uma correlação direta entre o peso do veículo ao consumo de combustível em determinado trajeto percorrido, este peso do veículo considera a carga carregada por ele, portanto, a carga é um fator de impacto no consumo de combustível. A figura 4 ilustra o comportamento do peso dos veículos e a correlação ao consumo de combustível.

Figura 4 – Ilustração da correlação entre peso dos veículos e taxa de distância percorrida por litro de combustível



Fonte: Autoria própria, baseado em Xiao et al. (2012).

Com base nessa correlação o autor através de regressão linear, define a fórmula 2.5, onde $\bar{\rho}_{i,j}$ é a taxa de consumo de combustível (FCR), em um arco i, j , θ é a capacidade do veículo, $\bar{\rho}^*$ é o FCR do veículo carregado, $\bar{\rho}_0$ é o FCR do veículo não carregado.

$$\bar{\rho}_{i,j} = \bar{\rho}_0 + \frac{\bar{\rho}^* - \bar{\rho}_0}{\theta} f_{i,j} \quad (2.5)$$

Considerando a fórmula 2.5 pode ser realizar a minimização do consumo de combustível através da fórmula 2.6.

$$\min \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N p_f d_{ij} (p_0 w_{ij} + \frac{\bar{\rho}^* - \bar{\rho}_0}{\theta} f_{ij}) \quad (2.6)$$

onde, p_f é o custo da unidade de combustível, $d_{i,j}$ a distância de um arco. i, j Nesta formula w_{ij} é uma a variável binaria igual a 1 se o veículo percorre o arco (i, j) e f_{ij} é um parâmetro de carga sobre o veículo.

Para fins de classificação, iremos denominar essa forma de categorização da inserção do carbono como **Modelagem de Xiao et al. (2012)**. O modelo completo encontra-se no anexo D.

2.3.3 Modelos de Taxas de Emissão de Carbono

Para esta metodologia não foi encontrado um autor em comum que tenha definido uma determinada fórmula para a minimização da emissão de carbono, neste caso a formulação é particular a cada artigo, mas possui em comum a o fato da função objetivo ter um parâmetro que é responsável pela emissão de carbono. Neste caso não é relacionado o gasto de combustível como nos métodos anteriores. Essas taxas, embora particulares a cada modelo, foram obtidas através de dados da literatura ou de dados reais pesquisados com os fabricantes dos veículos.

Este caso é utilizado principalmente em cenários com veículos heterogêneos, onde os veículos possuem diferentes taxas de emissão de carbono. Há uma decisão a ser otimizada que é a seleção do melhor veículo para cada trajeto percorrido. Essa forma de modelagem é utilizada não apenas em casos de modelos que envolvam veículos a combustível mas em veículos elétricos também.

Um exemplo que pode ser citado é a formulação de (BALAMURUGAN et al., 2018), que define um parâmetro E_k , que é a emissão realizada por cada veículo k por distância percorrida e a variável D_t , que é a distância percorrida em um trajeto, apresentados na fórmula 2.7. Neste caso, procura-se no modelo utilizar os veículos que emitem menos carbono nas maiores distâncias, e os veículos com maior emissão em menores distâncias.

$$\min \sum_t \sum_k D_t E_k \quad (2.7)$$

Outro exemplo é na formulação de (LIAO, 2017), que propõe um modelo que resolve o online *vehicle routing problem*, onde, online se refere a demandas em tempo simultâneo. Na função objetivo do modelo são minimizados o tempo no qual o veículo viaja e a penalidade de se infringir as janelas de tempo. A forma como o carbono é inserido é através do parâmetro E_{ij}^k que é a de emissão em um arco i, j , do veículo k . Essa taxa é multiplicada por uma variável que determina qual veículo é utilizado em cada arco.

Assim sempre que tivermos um parâmetro que é responsável por representar a emissão de carbono através de uma taxa, para fins de classificação, iremos denominar essa forma de **Modelagem de Taxas de emissão**.

2.4 Descrição dos Modelos

Nesta subseção iremos discutir as características dos modelos dos artigos analisados na revisão. Para realizarmos uma análise do desenvolvimento histórico dos artigos que tratam do problema de roteamento de veículos considerando a emissão de CO_2 e classificá-los em relação a suas principais características, foi criado um diagrama apresentado na figura 5. Nesta figura estão apresentados todos os 50 artigos alvo dessa revisão. Abaixo iremos explicar a figura e depois será feito uma análise dos artigos.

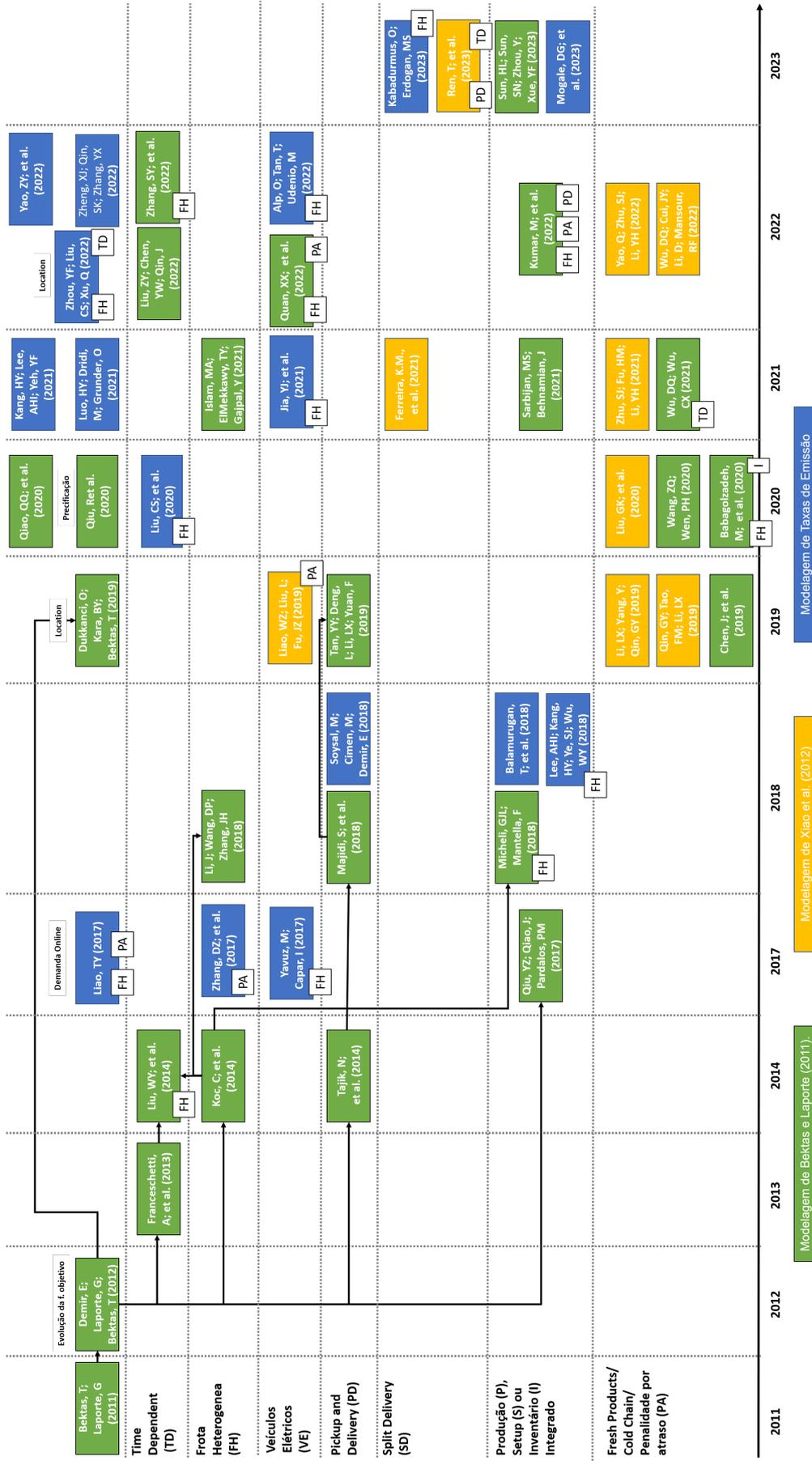
O eixo horizontal da figura 5 é uma linha do tempo, onde as referências bibliográficas de cada artigo estão dispostas indicando o ano de sua publicação. No eixo vertical os artigos estão categorizados conforme suas principais características de cada modelo. As características são:

- ***Time dependent***: que são os artigos que relacionam horários de pico e congestionamento aos modelos;
- **Frota Heterogênea**: possui uma frota de veículos heterogêneos onde cada veículo possui valores diferentes de taxa de emissão de carbono;
- **Veículos Elétricos**: a principal especificidade é considerar veículos elétricos;
- ***Pickup and Delivery***: ocorre tanto a entrega como a coleta de materiais nos clientes;
- ***Split Delivery***: entregas são fracionadas entre os clientes;
- **Produção, Inventário ou *Setup* Integrados**: integram a otimização da produção junto à redução da emissão de carbono;
- ***Fresh Products/Cold Chain*** trata de indústrias que lidam com produtos perecíveis que tem prazo de validade ou precisam ser refrigerados no seu transporte, se aplicam principalmente a indústria de alimentos.

Alguns artigos estão em mais de um grupo de característica definidas, no entanto, foram classificados de acordo com seu principal foco e contribuição e quando há outras características foi adicionado uma legenda secundária na referência do artigo. Os artigos que se encontram na primeira linha da figura 5 não se encaixam em um dos grupos de classificação mas foram discutidos na análise dos artigos na categoria **Outros**.

Os artigos também estão classificados em cores que correspondem à modelagem utilizada, onde verde é **Modelagem de Bektas e Laporte (2011)**, amarelo é **Modelagem de Xiao et al. (2012)** e azul é **Modelos de de Taxas de emissão**. Além dessas classificações os artigos também estão ligados por setas que mostram a evolução de cada modelo, em relação á qual modelo foram utilizado como base.

Figura 5 – Diagrama com classificação dos 50 artigos analisados em uma linha do tempo



JT = Janelas de Tempo; TD = Time dependent; PA = Penalidade por Atraso; FH = Tipo de frota heterogênea; VE = Veículos Elétricos PD = Pickup e Delivery; SD = Split delivery; PIS = Produção, inventário e Setup; IM = Indústria de Móveis.
 Fonte: Autoria própria.

Análise da Figura 5

Como mencionado, o artigo que define o *Pollution Routing Problem* é o artigo de (BEKTAŞ; LAPORTE, 2011), que traz uma definição de modelo que minimiza as emissões de carbono baseado na redução do gasto de combustível utilizando a fórmula 2.1 de (BARTH; YOUNGLOVE; SCORA, 2005). No ano seguinte Demir et al. (2012) traz uma evolução da função objetivo definida adicionando elementos que refletem o impacto da resistência ao ar do motor na emissão de combustível. Ambos artigos foram discutidos na seção 2.3 com detalhes sobre suas principais contribuições à formulação dos modelos para redução da emissão de CO_2 .

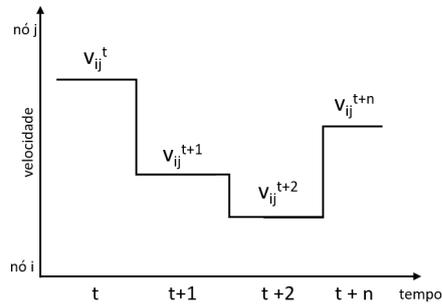
Time dependent

(FRANCESCHETTI et al., 2013) define um modelo *Time Dependent* com base na formulação de Demir et al. (2012), no artigo os autores definem um problema que considera o congestionamento e o tráfego de veículos em horários de pico. Para a modelagem desse cenário com “time-dependency” foi utilizado o trabalho de Jabali et al. 2012, onde os autores sugerem que a divisão dos horizontes de tempo, e nestas divisões dependendo do intervalo de tempo em que o veículo se encontra há uma velocidade diferente atribuída ao veículo. Isto é, nos horário de congestionamento definidos a velocidade do veículo é inferior a velocidade fora destes horários. Em seguida (LIU et al., 2014) construiu um modelo que além de ser *time dependent*, também considera frota heterogênea, onde são adicionados índices dos veículos nos parâmetros que descrevem a área frontal e peso do veículo. O artigo também trata de *alternative paths*, que refere-se a capacidade do modelo de considerar a seleção de diferentes opções de rota. Ambos artigos utilizam da modelagem de Bektas e Laporte (2011) para considerar o carbono.

No artigo de (LIU et al., 2020b) a construção do modelo tem como objetivo considerar um roteamento que evite o congestionamento dos veículos, isto é, definir rotas que evitem os horários de pico de tráfego. Inicialmente são avaliados diferentes cenários de congestionamento, considerando tanto horários de pico como tráfego temporário, que é menos previsível, para esta avaliação a velocidade v no arco (i, j) é variável em relação ao período de tempo t , a figura 6 reflete essa relação. É visto pela figura que a relação da velocidade v em um mesmo arco (i, j) pode variar de acordo com o período, representado pelo tempo t . Este artigo utiliza as taxas de emissão como forma de modelagem.

O trabalho realizado por (LIU; CHEN; QIN, 2022) traz um único horário de congestionamento que pode ocorrer em qualquer horário do horizonte de planejamento, que não necessariamente é o mesmo em diferentes períodos. São definidas quatro regiões de congestionamento que possuem diferentes velocidades em função do tempo: livre, congestionado, congestionado para livre e livre para congestionado. Já no artigo de (ZHANG et al., 2022) é abordado um *fixed tour*, isto é, uma rota onde os clientes visitados são fixos mas devido aos tempos de congestionamento serem diferentes, as velocidades, os

Figura 6 – Relação entre velocidade e tempo para um cenário *time-dependent*



Fonte: Autoria própria.

tempos de saída e espera são as variáveis a serem otimizadas. Neste caso de (ZHANG et al., 2022) por exemplo, poderiam ser definidas diferentes velocidades em alguns trajetos em função do horário de congestionamento, e como a velocidade impacta na emissão de carbono, esta decisão impactaria diretamente na emissão de carbono. Para estes dois artigos foi utilizada a inserção através da modelagem de Bektas e Laporte (2011).

Frota Heterogênea

O primeiro artigo que traz uma frota heterogênea é o de (KOÇ et al., 2014), no modelo definido são considerados três tipos de veículos e a seleção deles é baseada no critério de minimização da emissão de carbono. Os tipos de veículo diferem entre si em relação a seu porte, que pode ser pequeno, médio ou grande, e possuem características físicas e do motor do veículo correspondentes ao seu porte. As características são: peso do veículo, capacidade de carga máxima, área frontal, velocidade do motor, fator de fricção do motor e deslocamento do motor do veículo, sendo este último a relação entre gás e combustível que é queimado nos cilindros. Essa diferença é refletida na função objetivo ao ser adicionado um índice de veículo aos parâmetros que descrevem o veículo, esse artigo reflete a diferença dessas características na função objetivo, alterando o Pollution Routing Problem desenvolvido por Bektas e Laporte (2011).

O trabalho de (ZHANG et al., 2017) estabeleceu um modelo para minimizar o custo total de uma organização que trabalhe com serviços logísticos multimodais, o modelo proposto incorpora custos de emissão de CO_2 para determinar quais as opções ideais dos modais. São considerados transportes rodoviários, ferroviários, marítimos ou aéreos que visam a entrega de um material que sai de uma origem até um destino final, e pode ter cidades intermediários (nós) no caminho. O trajeto de cada nó pode ser feito por apenas um modo de transporte. Este artigo utiliza a modelagem de taxas de emissão para realizar a seleção do modal.

No estudo de (LI; WANG; ZHANG, 2018) é definido um modelo que considera uma frota de veículos heterogênea fixada, esse modelo se diferencia por ter um termo de custo de veículos na função objetivo. No artigo de (ISLAM; GAJPAL; ELMEKKAWY,

2021) é definido o primeiro modelo de frota heterogênea que descreve uma frota composta por veículos movidos à combustível fóssil e veículos à base de hidrogênio. Além de agregar esses dois tipos de veículos, o modelo descrito também se caracteriza por ter o roteamento baseado em agrupamentos (*clusters*), onde cada veículo que atende um cliente do agrupamento, deve atender todos os outros até ir para o próximo. Ambos artigos utilizam a modelagem de Bektas e Laporte (2011) para a consideração das emissões de carbono.

Veículos Elétricos

No artigo de (YAVUZ; ÇAPAR, 2017) é proposto um cenário com uma rota de dois tipos de veículos que utilizem combustível do tipo GDVs (Veículos de gasolina e diesel) ou AFVs (Veículos de combustível alternativo). Os veículos do tipo GDV possuem maior autonomia pois, o reabastecimento do combustível é rápido e pode ser feito em diversos pontos das rodovias, já os veículos AFVs possuem menor autonomia devido à sua necessidade de recarga e a limitação dos locais que isso pode ser feito, neste caso considera-se apenas o depósito como local de recarga. O modelo com base nesse cenário utiliza uma variável para indicar qual melhor veículo para cada trajeto determinado na sua solução com base no critério de minimização das emissões de carbono, distância percorrida e custo fixo dos veículos.

Complementando o estudo anterior, o artigo de (LIAO; LIU; FU, 2019) estuda a otimização do roteamento de veículos considerando as políticas de comércio de carbono. Para isto, são construídos dois modelos que objetivam comparar os impactos de veículos a combustível ao de veículos elétricos, sendo que em ambos casos são considerados na minimização os custos fixos dos veículos, depreciação, penalidades por violar as janelas de tempo, energia e custos de emissão de carbono. Dois pontos importantes são constatados por essa comparação, o primeiro é o impacto da capacidade da bateria e o custo de recarga nos custos de veículos elétricos, e o segundo é o papel do preço do carbono e sua capacidade de influenciar nas decisões de qual veículo é mais adequado. Embora os veículos elétricos possam reduzir a emissão de CO_2 , o custo da emissão é inferior aos custos de recarga da bateria do veículo devido a sua capacidade. Este artigo utiliza a modelagem de Xiao et al. (2012) para a consideração das emissões de carbono.

A pesquisa de (JIA et al., 2021) considera uma frota heterogênea com veículos elétricos e à combustível que utilizam um *bike-sharing systems* (BSSs). Os BSSs se relacionam ao desafio logístico *Bike-sharing Rebalancing Problem* (Problema de Rebalanceamento em Sistemas de Compartilhamento de Bicicletas), que é enfrentado pelos operadores de sistemas de compartilhamento de bicicletas. Nesses sistemas as bicicletas são disponibilizadas em estações espalhadas por uma área urbana para que as pessoas possam alugá-las e usá-las em suas viagens. No entanto, à medida que as bicicletas são retiradas de algumas estações e deixadas em outras durante o dia, as estações podem

ficar desequilibradas em termos de oferta e demanda. O problema de rebalanceamento surge quando algumas estações ficam com excesso de bicicletas, enquanto outras ficam com falta de bicicletas. Isso pode acarretar em situações que os usuários não conseguem encontrar bicicletas disponíveis quando precisam ou não têm onde estacionar as bicicletas após a viagem. Portanto, o rebalanceamento envolve mover eficientemente as bicicletas de estações com excesso para estações com falta, a fim de manter um equilíbrio adequado. Neste artigo é utilizada a modelagem de taxas de emissão.

No artigo de (QUAN et al., 2022) é descrito um modelo para atuar no problema de distribuição de recursos médicos entre áreas de diferentes status financeiro, considerando a emissão de carbono através da modelagem de Bektas e Laporte (2011). Já no artigo de (ALP; TAN; UDENIO, 2022) são utilizados caminhões elétricos e caminhões a base de combustível, o ponto interessante deste artigo é que duas variáveis são adicionadas, que é o número de estações de carregamentos a serem construídas entre os pontos de roteamento e o número possível de veículos que podem ser recarregados nessas estações, onde quanto maior é o número de estações e maior sua capacidade de carregar, maior é o custo relacionado. Na função objetivo deste artigo são minimizados o custo de compra dos caminhões, custo de combustível e eletricidade gasto, custos de manutenção, de emissão de carbono, custo de mão de obra e das instalação das estações de carregamento considerando sua capacidade. Este artigo utiliza a modelagem de taxas de emissão para considerar a emissão de carbono. É importante ressaltar que em todos os artigos a necessidade de recarga do veículo e sua autonomia foram pontos importantes que impactam na tomada de decisão.

Pickup and Delivery

No artigo de (TAJIK et al., 2014) aparece o primeiro modelo que traz a redução de carbono em um processo de *pickup e delivery*, esse artigo propõe o PRP em um cenário com uma complexidades adicional, que é a entrega e coleta de itens nos clientes, onde há dois conjuntos de clientes no modelo, um P para *pickup* e um D para *delivery* e a demanda é relacionada aos dois conjuntos, sendo a demanda positiva para os cenários de *pickup* e negativa para os cenários de *delivery*. Neste artigo as emissões de carbono são inseridas através da modelagem de Bektas e Laporte (2011).

No trabalho de (MAJIDI; HOSSEINI-MOTLAGH; IGNATIUS, 2018), embora a forma de considerar o carbono seja a mesma do artigo anterior, foi desenvolvido um modelo diferente em relação ao *pickup e delivery*, neste modelo cada cliente possui uma demanda de *pickup e delivery* simultaneamente, em uma frota homogênea. Isto é, em cada parada nos clientes o veículo pode ou não fazer tanto a coleta como a entrega de itens.

Já (TAN et al., 2019) definem um modelo que aborda o *pickup e delivery in the last mile*, isto é, o processo de planejamento e otimização das operações de coleta e entrega de mercadorias na fase final da cadeia de suprimentos envolvendo a entrega

aos consumidores finais. A "última milha" é o trecho final do percurso logístico, onde a mercadoria é transportada do último centro de distribuição ou depósito até o destino final do cliente. Este modelo considera em um depósito, vários locais de coleta onde os clientes podem retirar suas mercadorias por conta ou podem optar por serem atendidos de uma forma de distribuição de entrega em domicílio.

Split Delivery

Três artigos trazem a abordagem de *Split Delivery*, isto é, a realização de entregas fracionadas aos clientes. Neste caso os veículos podem passar mais de uma vez no mesmo nó i para atender a demanda d_i do cliente em diversas entregas.

No artigo de (FERREIRA; QUEIROZ; TOLEDO, 2021) são definidos três modelos, um com entregas fracionadas, um com a redução da emissão de carbono e um modelo final que combina as entregas fracionadas e a redução da emissão de carbono. Ao se comparar os modelos é visto que o modelo com redução de carbono e *split delivery* é o mais benéfico em redução de custos, no entanto, possui o maior tempo de execução computacional na maioria dos casos.

O estudo de (KABADURMUS; ERDOGAN, 2023) descreve um modelo que além do *split delivery* também considera uma frota heterogênea e um cenário multi-depósito, utilizando da modelagem de taxas de emissão para considerar o CO_2 . Já no trabalho realizado por (REN et al., 2023) além do *split delivery* também ocorre o *split pickup*, neste cenário também há a consideração de penalidade pro atraso em um cenário de multi-produtos. Neste mesmo cenário são consideradas diversas facilidades, como centros de distribuição, armazém de matéria prima, armazém de produto acabado e fábricas de produção, onde depois de receber as demandas de materiais de uma planta de produção, o centro de distribuição organiza um determinado número de caminhões para coletar e entregar as mercadorias no armazém de matéria-prima, na planta de processamento primário, na planta de processamento secundário e no armazém de produtos acabados em sequencia. Diferente do modelo anterior, tanto este como o de (FERREIRA; QUEIROZ; TOLEDO, 2021) utilizam a modelagem de Xiao et al. (2012) para considerar a emissão de CO_2 .

Produção, Inventário ou *Setup* Integrados

No artigo de Qiu (QIU; QIAO; PARDALOS, 2017) é realizada a primeira integração da produção com a minimização da emissão de carbono e gasto de combustível. O autor constrói uma função objetivo única que realiza a minimização dos custos de produção, *setup*, inventário e roteamento. Neste caso o roteamento é representado pelos custos de distância percorrida, gasto de combustível e emissão de carbono. Na minimização da produção são adicionados parâmetros para cada item que refletem a sua emissão de carbono e por isso considera a possibilidade de se ter *lost sales*, isto é, não atender totalmente

a demanda e perder venda em função do impacto que a produção pode ter na emissão de carbono, relacionado á esse parâmetro de emissão de cada produto. Em relação ao roteamento é utilizada a função desenvolvida por Bektas e Laporte (2011). No modelo também é considerado um *trade off* representado pelos custos de crédito de carbono.

Por (MICHELI; MANTELLA, 2018) é proposto um modelo inicial que otimiza de forma integrada o inventário, a emissão de carbono atrelada ao gasto de combustível e os custos de mão de obra. Além das restrições de inventário, o modelo também conta com uma restrição específica para representar a incerteza de demanda, que é descrita no artigo. Logo após a definição do modelo inicial são definidos outros modelos que refletem políticas de controle e comércio de emissão de carbono e para esses três modelos foram desenvolvidas funções objetivos que refletem as respectivas políticas, são eles:

- Política de limite de emissão de carbono (*Cap policy*): De acordo com esta política as emissões de carbono geradas pelas atividades de uma empresa não podem ultrapassar um determinado limite de emissão de CO_2 definido por uma autoridade reguladora. O descumprimento dessa restrição é sancionado com multas, que podem ser proporcionais ao excesso de emissões ou podem ser uniformes.
- Política de imposto de carbono (*Carbon Tax*): Neste caso as emissões de carbono são precificadas proporcionalmente ao volume de emissões. O imposto sobre o carbono baseia-se no princípio do “poluidor-pagador” e deve funcionar como um incentivo para avançar para a solução de baixo carbono mais rentável.
- Política de *cap-and-trade* e *Cap-and-offset policy*: se baseiam na compra e venda de créditos de carbono para compensar as emissões realizadas, esses elementos são integrados no modelo.

No artigo de (LEE et al., 2018) é proposto uma função objetivo que minimiza diversos custos, são eles: transporte, produção, emissão de carbono, inventário e penalidade por atraso . A minimização do carbono é feita através da modelagem de taxas de emissão. Para o transporte é multiplicada a distância percorrida por uma taxa de emissão de carbono por unidade de distância, para a produção é multiplicado uma taxa de emissão por unidade produzida pela quantidade de unidades produzidas, e o mesmo é feito para o custo de material, onde é multiplicado uma taxa de emissão por unidade de material comprado. Este estudo utilizou uma fábrica de produção de ferramentas em Taichung, Taiwan. O autor informa os valores das taxas de emissão de carbono mas não descreve como foram obtidos, no entanto, é assumido que veículos maiores emitem mais CO_2 . Também baseado na metodologia de taxas de emissão o modelo de (BALAMURUGAN et al., 2018) minimiza de forma integrada o inventário e a emissão de carbono, conforme exemplificado na seção 2.3.

O trabalho feito por (SARBIJAN; BEHNAMIAN, 2020) traz um cenário multi-produto que integra na função objetivo custos de produção, manutenção, terceirização e emissão de CO_2 no roteamento em uma frota homogênea. O diferencial do artigo é trazer o cenário de *outsourcing* e também a importância de se ter uma análise integrada, uma vez que os processos de produção e roteamento tem impacto entre si e essa relação pode afetar os custos totais da organização.

No artigo de (KUMAR et al., 2022) é definido um modelo sobre itens retornáveis com *delivery e pickup*, que integra na sua função objetivo a minimização de inventário, considerando também itens perecíveis. A resolução do problema aponta que diversos custos podem ser salvos. O estudo de (MOGALE et al., 2023) possui como destaque a aplicação de um modelo de transporte *cross-docks*, isto é, receber e transferir as mercadorias de um veículo para outro, com mínima estocagem intermediária, este método logístico é utilizado para agilizar a distribuição e reduzir custos de armazenagem. Na função objetivo do modelo são minimizados o custo de inventário, custos fixos de transporte, emissão de carbono e um custo fixo de *cross-dock* considerando um cenário com diversos fornecedores, clientes e localidade de *cross-dock* para se realizar a transferência das cargas. Esse artigo teve como objetivo a aplicação no varejo, utilizando como base uma indústria real na Índia. E para finalizar os artigos que integram a produção, inventário e/ou *setup* de alguma forma, (SUN et al., 2023) integra o planejamento da produção, inventário e roteamento, considerando dois aspectos importantes: a emissão de CO_2 e multiprodutos com perecibilidade, e para isto são desenvolvidos dois modelos. O primeiro foca na minimização de carbono nas etapas de produção, inventário e roteamento e o segundo foca na deterioração dos produtos.

Fresh Products/Cold Chain

Diversos artigos abordam especificamente a redução da emissão de CO_2 às indústrias de alimentos perecíveis, cuja principal característica é o prazo de validade dos alimentos. Um dos termos utilizados para essa indústria é “*Cold Chain*” que refere-se ao processo de transporte e armazenamento de produtos sensíveis à temperatura, mantendo-os em um intervalo de temperatura específico para garantir sua qualidade e segurança. Outro termo utilizado é “*Fresh Food*” que se refere a alimentos perecíveis e sensíveis à deterioração, que têm um curto prazo de validade e precisam ser entregues ou utilizados rapidamente para manter sua qualidade e segurança. É interessante observar pela figura 5 que a maioria (66,6%) dos modelos que utilizam a modelagem de taxas de emissão se encontram nessa categoria.

No artigo de (LI; YANG; QIN, 2019) o modelo construído integra a otimização de inventário, danificação dos produtos, custos fixos dos veículos, consumo de combustível e emissão de carbono através da metodologia de Xiao. Neste artigo é definida uma formulação inicial ao problema e depois formulações de modelos alternativos com implementação de políticas para redução da emissão de carbono, como o *Carbon Cap Policy*, onde há um

valor máximo permitido de emissão, *Carbon Tax Policy*, onde há uma taxaço para as emissões emitidas em excesso, *Carbon Cap-And Trade Policy* onde o crédito de carbono é tratado como commodity e pode ser vendido. Como base para o modelo foi utilizada uma indústria real de porte grande de alimentos que necessitam de refrigeração.

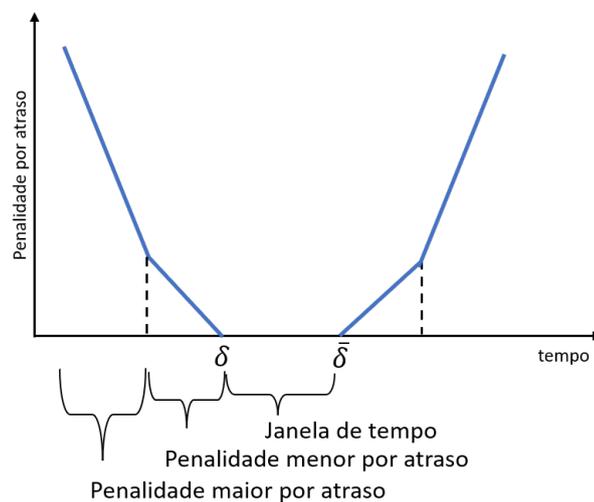
Já o artigo de (CHEN et al., 2019) foi baseado em uma indústria de alimentos do distrito do arquipélago de Zhoushan na China. Neste artigo é definido um modelo que minimiza os custos fixos dos veículos, custos de combustível e carbono, penalidades por degradação dos produtos frescos e atraso nas janelas de tempo. Para a penalidade dos produtos frescos são elencados “deadlines”, isto é, prazos para a entrega em cada cliente, e seu atraso acarreta em penalidade. No estudo realizado por (QIN; TAO; LI, 2019) é construído um modelo baseado em uma indústria de transporte com refrigeração, com a proposta de uma função objetivo que minimiza o custo dos veículos, penalidade por degradação dos produtos, custos de refrigeração, de combustível e emissão de carbono.

O estudo de (QIAO et al., 2020) trata-se de um caso aplicado de uma empresa 3PL (*Third Party Logistics*) da China, isto é, um operador logístico terceirizado, que opera com veículos refrigerados de frota heterogênea. No modelo definido são minimizados os custos financeiros (custos fixos, deterioração, combustível e eletricidade dos veículos refrigerados) e os custos de emissão de carbono. Porém, esse modelo se destaca por ter também uma maximização da satisfação dos clientes. Nota-se nas aplicações que essa maximização tem influência crítica na tomada de decisão indicada pelo modelo e é importante para a empresas do tipo 3PL. O objetivo da pesquisa realizada por (BABAGOLZADEH et al., 2020) é desenvolver um modelo de otimização linear inteira mista adaptada para uma cadeia de suprimentos que trabalhe com a necessidade de refrigeração e que considere a incerteza de demanda com uma frota heterogênea. A incerteza da demanda é representada por um conjunto discreto de cenários, onde há um depósito que entrega a um conjunto de distribuidores. Outro ponto importante é que são aplicados aos modelos regulamentações relacionadas a emissão de carbono, que se não forem atendidas acarretam em taxas a serem pagas. Os custos minimizados são de armazenamento, transporte, perda de vendas e emissão de carbono, portanto, também considera a integração com o inventário. No estudo foi observado que utilizar uma frota heterogênea pode gerar mais benefícios em relação a sustentabilidade, também observou-se que que um preço de emissão mais alto nem sempre resulta em melhoria ambiental. Essa descoberta pode ter um valor significativo para os formuladores de políticas, ao desenvolver e implementar regulamentos de emissões de carbono.

A pesquisa realizada por (LIU et al., 2020b) tem duas grandes contribuições. A primeira é a definição de um modelo que considera a distribuição conjunta de várias organizações em um único centro de distribuição, que funciona como um depósito consolidador. A segunda é como o preço do carbono afeta os níveis de decisão de carbono em

um modelo que visa essa minimização em uma função objetivo que integra transporte, custos fixos, perda de produtos pela refrigeração, custo da refrigeração, penalidade por atrasos e emissão de carbono. O estudo de (WU; WU, 2021) traz um ponto importante, que é, para produtos alimentícios perecíveis, como os diferentes prazos de perecibilidade podem afetar nas decisões do modelo, para isso o autor cria o modelo TDGVRPSTW, caracterizado por ser *time dependent*, minimizar emissão de carbono, com janelas de tempo "soft". Essas janelas estão apresentadas na figura 7, onde o descumprimento das janelas de tempo acarreta em um valor de penalidade, que pode ser maior ou menor em relação a quanto esse tempo é infringido, ou seja, quanto maior o descumprimento das janelas de tempo maior é o valor a ser considerado como penalidade.

Figura 7 – Curva do custo de penalidade em função do descumprimento das janelas de tempo



Fonte: Autoria própria.

No artigo de (WU et al., 2022) o destaque é o foco no nível de frescor dos produtos, focando neste impacto na decisão de escolha do consumidor, para isto, na função objetivo há uma divisão pelo índice de frescor. No trabalho de (YAO; ZHU; LI, 2022) o destaque da contribuição é seu direcionamento para uma política financeira sobre os impactos de carbono, que é o pagamento das empresas pela emissão, combinando ao modelo a consideração do impacto da perda de carga e seu nível de frescor.

Location

Apenas dois modelos trabalhos o problema de localização (*Location*), no primeiro artigo (DUKKANCI; KARA; BEKTAŞ, 2019) define um modelo que combina o *Pollution Routing Problem* com o *Location Routing Problem*, que além da definição das rotas com a minimização da emissão de CO2 e gasto de combustível também realiza a localização de instalações em um subconjunto discreto de pontos. Adicional ao PRP no *Location Routing Problem*, o objetivo é determinar as melhores localizações para um conjunto de instalações (por exemplo, depósitos, armazéns, fábricas) e ao mesmo tempo planejar as

rotas para os veículos que servirão essas instalações. O problema é complexo porque as decisões de localização das instalações afetam diretamente as rotas dos veículos, e as rotas dos veículos por sua vez afetam os custos de transporte e operação das instalações. Isso cria uma interdependência entre os dois aspectos do problema.

O segundo modelo é o de (ZHOU; LIU; XU, 2022) que unifica o *Location Routing Problem* ao *Pollution Routing Problem* considerando um cenário *Time Dependent*. Diferente do modelo de (DUKKANCI; KARA; BEKTAŞ, 2019) que considera o carbono através da Metodologia de Betkas e Laporte (2011), este modelo utiliza a Metodologia de Taxas de Emissão.

Outros

Ressalta-se também que um dos tópicos que foi discutido em diversos artigos é como as políticas de controle de emissões dos gases GEE podem afetar na tomada de decisão, como a *Cap Policy*, *Carbon Tax* e *Cap-and-trade Policy*. No artigo de (QIU et al., 2020) é discutido esse impacto das iniciativas de precificação a nível global utilizando um modelo em dois níveis: no nível superior, a empresa de transporte deve decidir o tamanho e composição da frota, enquanto no nível inferior, cada veículo deve determinar a rota mais eficiente para atender às demandas dos clientes. Esse artigo tem uma importância especial neste trabalho, pois foram obtidos dele dados que são baseados em dados reais, que serão utilizados nos experimentos computacionais da presente dissertação, que serão apresentados no capítulo 4.

Outros três artigos citam aplicações específicas do modelo construído, no artigo de (QIAO et al., 2020) é retratado um modelo aplicado a coleta de resíduos sólidos de um município, no estudo de (LUO; DRIDI; GRUNDER, 2021) é descrito um modelo que se aplica a distribuição de equipamentos médicos domésticos e no artigo de (ZHENG; QIN; ZHANG, 2022) é feito um estudo que descreve a distribuição de sangue para os centros médicos necessários. Esses modelos não possuem semelhança relevante para a indústria de móveis.

2.5 Considerações sobre a revisão bibliográfica e potenciais de pesquisa

Etapa 5

Esta revisão teve como objetivo passar um panorama geral de como tem sido realizada a inserção do carbono nos modelos de otimização linear inteira mista. Com base nisso foi realizada a classificação dos artigos com base no protocolo definido e observou-se que os artigos podem ser agrupados em relação a forma que se baseiam para modelar as emissões de carbono. Também foram classificados com base nas características do modelo.

Estas características dos modelos estão resumidas na tabela 6, nela a primeira coluna da tabela traz a referência do artigo e em seguida são apresentadas características presentes nos 50 modelos apresentados na seção 2.4. Ao fim da tabela há uma linha descrevendo onde esta dissertação se encaixa em relação à essas características.

Com base na tabela vemos que para os modelos que atuam na redução de emissão de CO_2 há uma lacuna em relação a um modelo que integre inventário e trocas ao roteamento e considere uma frota heterogênea. O único modelo que considera custos de inventário e *setup* é o de (QIU; QIAO; PARDALOS, 2017), que no entanto, não considera uma frota heterogênea, portanto há uma oportunidade de estudo.

Adicional a essas características descritas, esta dissertação se destaca também por ser aplicada a indústria de móveis, algo que nenhum dos 188 artigos aborda. Por ser específico à indústria de móveis, há características presentes no modelo adicionais a tabela 6, que serão descritas com maior detalhe na próxima sessão, como por exemplo:

- Produção de componentes (multi-componentes) e a entrega de produtos finais (multiprodutos);
- Utilização do inventário do período anterior para fazer os carregamentos;
- Definição do sequenciamento da produção devido ao custo de *setup*;
- O uso de tempo contínuo para rotas;
- Múltiplas janelas de tempo e tempos máximo de entrega para cada cliente;
- Multi-rotas e multi-períodos.

Enfatizamos que o problema tratado nesse estudo trata-se de um *rich production, inventory and routing problem*, baseado numa situação de fato real. Existem outras lacunas que poderão ser tratados em trabalhos futuros. Extensões interessantes incluindo outros tipos industriais abordariam a viabilidade de extensões de modelos considerando por exemplo uma frota heterogênea com veículos elétricos ou a consideração de *pickup e delivery*. Seria interessante também realizar uma revisão bibliográfica com o direcionamento de quais métodos de solução estão sendo utilizados pra modelos que abordam a redução de CO_2 .

Tabela 6 – Características dos 50 artigos selecionados na revisão e esta revisão

Referência	JT	TD	PA	FH	VE	PD	SD	PIS	IM
(BEKTAŞ; LAPORTE, 2011)	x								
(DEMİR; BEKTAŞ; LAPORTE, 2012)	x								
(FRANCESCHETTI et al., 2013)	x	x							
(TAJIK et al., 2014)	x								
(KOÇ et al., 2014)	x								
(LIU et al., 2014)	x	x							
(QIU; QIAO; PARDALOS, 2017)	x								P,I,S
(YAVUZ; ÇAPAR, 2017)	x								
(LIAO, 2017)	x								
(ZHANG et al., 2017)	x								
(MAJIDI; HOSSEINI-MOTLAGH; IGNATIUS, 2018)	x								
(SOYSAL; ÇİMEN; DEMİR, 2018)	x								
(BALAMURUGAN et al., 2018)									I
(MICHELİ; MANTELLA, 2018)									I
(LI; WANG; ZHANG, 2018)									
(LEE et al., 2018)									P,I
(TAN et al., 2019)	x								
(DUKKANCI; KARA; BEKTAŞ, 2019)	x								
(LI; YANG; QIN, 2019)									I
(LIAO; LIU; FU, 2019)	x								
(CHEN et al., 2019)	x								
(QIN; TAO; LI, 2019)	x								
(QIU et al., 2020)	x								
(LIU et al., 2020b)	x								
(QIAO et al., 2020)									
(LIU et al., 2020a)	x	x							
(WANG; WEN, 2020)	x								
(BABAGOLZADEH et al., 2020)									I
(SARBIJAN; BEHNAMIAN, 2020)									P
(WU; WU, 2021)	x	x							
(LUO; DRIDI; GRUNDER, 2021)	x								
(ZHU; FU; LI, 2021)	x								
(ISLAM; GAJPAL; ELMEEKAWY, 2021)	x								
(JIA et al., 2021)									
(KANG; LEE; YEH, 2021)	x								
(FERREIRA; QUEIROZ; TOLEDO, 2021)									
(QUAN et al., 2022)	x								
(YAO; ZHU; LI, 2022)	x								
(YAO et al., 2022)									
(WU et al., 2022)	x								
(KUMAR et al., 2022)	x								I
(ZHENG; QIN; ZHANG, 2022)									
(ALP; TAN; UDENIO, 2022)									
(LIU; CHEN; QIN, 2022)	x	x							
(ZHOU; LIU; XU, 2022)	x	x							
(ZHANG et al., 2022)	x	x							
(KABADURMUS; ERDOGAN, 2023)									
(REN et al., 2023)	x	x							
(SUN et al., 2023)									
(MOGALE et al., 2023)									
Esta dissertação	x								

JT = Janelas de Tempo; TD = *Time dependent*; PA = Penalidade por Atraso; FH = Tipo de frota heterogênea; VE = Veículos Elétricos PD = *Pickup e Delivery*; SD = *Split delivery*; PIS = Produção, inventario e *Setup*; IM = Indústria de Móveis.

3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E MODELO PROPOSTO

Nesse capítulo são apresentadas as características e os processos de produção e distribuição na indústria de móveis considerando emissões de CO_2 . Na subseção 3.1 são apresentados os processos produtivos, na seção 3.2 é realizada a descrição do problema considerando as emissões de CO_2 e por fim na seção 3.3 é apresentado o modelo proposto para representar o problema CarbonLSMVRP (*Carbon lot-scheduling multi-vehicle routing problem*).

3.1 Processos Produtivos na Indústria de Móveis

A indústria de móveis engloba a produção e comercialização de móveis para escritórios, residências e outros ambientes. As empresas deste ramo industrial são caracterizadas por ter alta competitividade e são influenciadas por tendências de design, disponibilidade de matéria-prima, custos de mão de obra e também pela viabilidade e poder de compra dos consumidores.

No fluxograma da figura 8 estão apresentadas as principais etapas do processo de fabricação e distribuição. De forma geral, o início ocorre na aquisição de matéria prima, em seguida ocorrem as etapas de produção, após a produção há a armazenagem de um estoque intermediário de componentes, o processo é finalizado na distribuição dos produtos para os clientes (MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019).

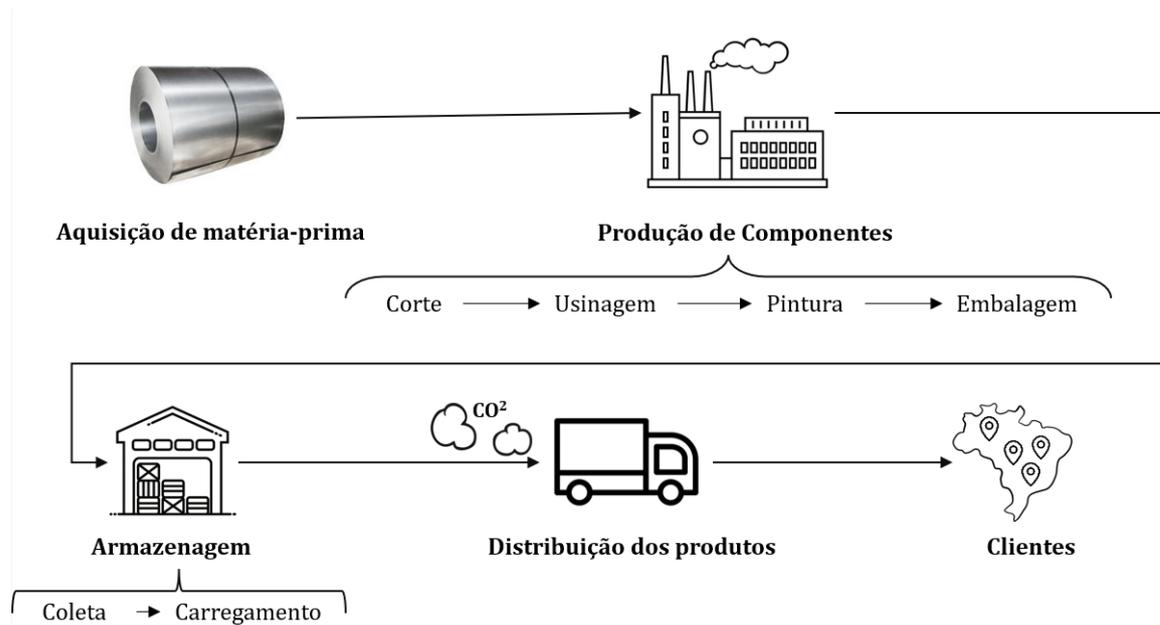
Aquisição de Matéria Prima

Os móveis produzidos na empresa do estudo tem o aço como matéria-prima, no entanto, os processos descritos facilmente podem ser adaptados para móveis de outras matérias-primas, como madeira. A diferença entre o tipo de matéria-prima é principalmente no maquinário utilizado durante as etapas de corte, usinagem e pintura. Antes das etapas de produção há aquisição de matéria-prima, que podem ser bobinas e chapas de aço, essa aquisição é baseada no planejamento da produção, que utiliza como quantidade a ser comprada a demanda dos produtos finais.

Produção de Componentes

Observamos pela figura 8 que a produção possui várias etapas, e inicia-se com a destinação das matérias às etapas de corte e usinagem, onde são moldadas para o seu formato final. Nestas etapas podem ser utilizadas mais de uma máquina simultaneamente, que podem transformar a matéria prima em diversas peças ao mesmo tempo. Na etapa

Figura 8 – Fluxograma das etapas de produção e distribuição da indústria de móveis



Fonte: Autoria própria.

de usinagem há a moldagem destas peças, que são dobradas, perfuradas e transformadas no formato final. Neste trabalho denominaremos estas peças de itens ou componentes. Após essas etapas de corte e usinagem os itens seguem para uma etapa de proteção dos materiais (fosfatização) e são levados à cabine de pintura.

A etapa de pintura pode ser feita por tinta em pó ou líquida, e há diferenças importantes entre os tipos de pintura. Na pintura líquida a tinta é atomizada (pulverizada) e são utilizadas pistolas de pressão que possibilitam uma troca de cores de forma mais rápida e fácil, com tempo para limpeza desprezível. Já nas pinturas em pó, são utilizados equipamentos como pistolas eletrostáticas que demandam um aquecimento de 150°C até 200°C para que o pó derreta e se una à superfície do componente, neste caso a pintura a pó demanda mais tempo de troca pois, pode ocorrer contaminação dos itens caso a limpeza não seja feita corretamente, em compensação, os itens pintados com tinta em pó apresentam um acabamento melhor e são mais resistentes que a pintura líquida. Para esta dissertação consideraremos como etapa do processo a pintura utilizando tinta em pó, neste caso o tempo não é desprezível e a definição da ordem de cores trocadas na linha de produção é extremamente importante na otimização do tempo da linha, pois o tempo de limpeza entre as cores neste processo é alto.

Portanto, o processo de pintura é o gargalo no processo produtivo, onde a preparação da linha de produção na pintura a pó possui um tempo significativo e por isso o sequenciamento deve ser levado em consideração no momento da programação da produção. Por ser o gargalo da produção, nesta dissertação o sequenciamento e programação da produção são parte do problema a ser modulado e resolvido.

No cenário tomado como base para essa dissertação há apenas uma linha de produção onde é realizada a pintura. Neste caso pode-se ter o *setup carry-over* ao fim de um período, ou seja, a linha se mantém preparada para o próximo período se for o mesmo item a ser produzido. Após os itens serem pintados e secados eles seguem para embalagem e em seguida para a armazenagem. É importante que a produção atenda a demanda dos produtos, de modo que não ocorra atrasos e seja feito o atendimento total dos pedidos dos clientes, para isto o planejamento deve definir as quantidades de peças em cada período do horizonte planejado.

Dentro dos processos de produção de móveis há emissão de carbono pela utilização dos maquinários, no entanto, como a demanda dos clientes deve ser atendida, não estamos considerando alguma forma de redução da emissão de CO_2 na produção. Dentro da etapa de produção, os temas mais abordados na indústria de móveis em relação ao redução dos impactos ao meio ambiente são o descarte dos resíduos sólidos de sobra na produção, por estarem atrelados a legislações e o design sustentável.

Armazenagem

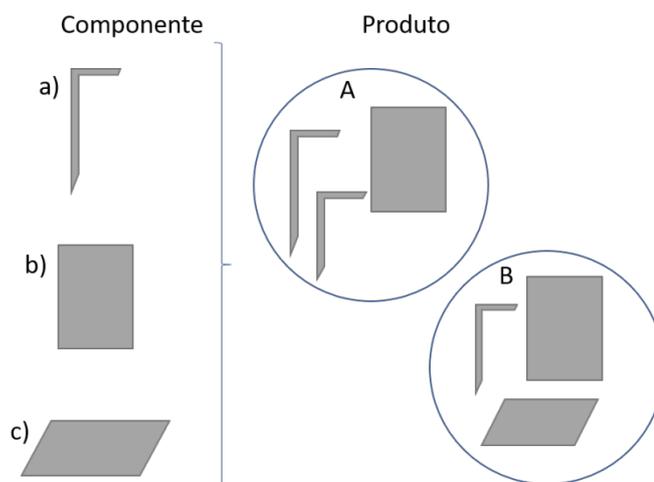
É importante sabermos a diferença entre componente e produto, os componentes são as peças e itens que combinados compõem o produto final. Por exemplo, um armário é composto por portas, prateleiras e parafusos, neste caso os componentes são as portas, prateleiras e parafusos e o armário é o produto final.

A indústria que estamos descrevendo possui um modelo multi-componente e multi-produto. Na figura 9 está ilustrada essa relação entre os produtos finais e os componentes. Nesta figura temos componentes a, b, c e estes são correlacionados de determinadas formas para produzir os produtos A e B. Os produtos finais também são denominados de kit's. Vemos na figura 9 que o produto A é composto por 2 unidades do componente a e 1 unidade do componente b. Já o produto B é composto por 1 unidade do componente a, 1 unidade do componente b e 1 unidade do componente c. Essa relação é extremamente importante para manter os níveis de estoque ideais.

Na indústria de móveis é frequente se utilizar de uma estratégia de estocagem denominada *postponement strategy*, onde é realizado o adiamento da atividade de empacotamento de produtos finais até a certeza da demanda dos clientes pelos produtos finais para evitar trabalhos desnecessários. Portanto, o estoque intermediário é mantido em componentes, e os produtos finais são montados apenas quando vão para a etapa de distribuição. É importante considerar que este estoque pode representar um custo financeiro importante para a empresa, e sua otimização deve ser feita para melhor "saúde" do caixa financeiro.

Outro aspecto importante é que também podem haver estoques mínimos de cada componente, esses níveis de estoque devem ser considerados em cada período do horizonte

Figura 9 – Relação entre componentes e produtos



Fonte: Autoria própria.

de planejamento e servem como segurança para o atendimento das demandas dos clientes.

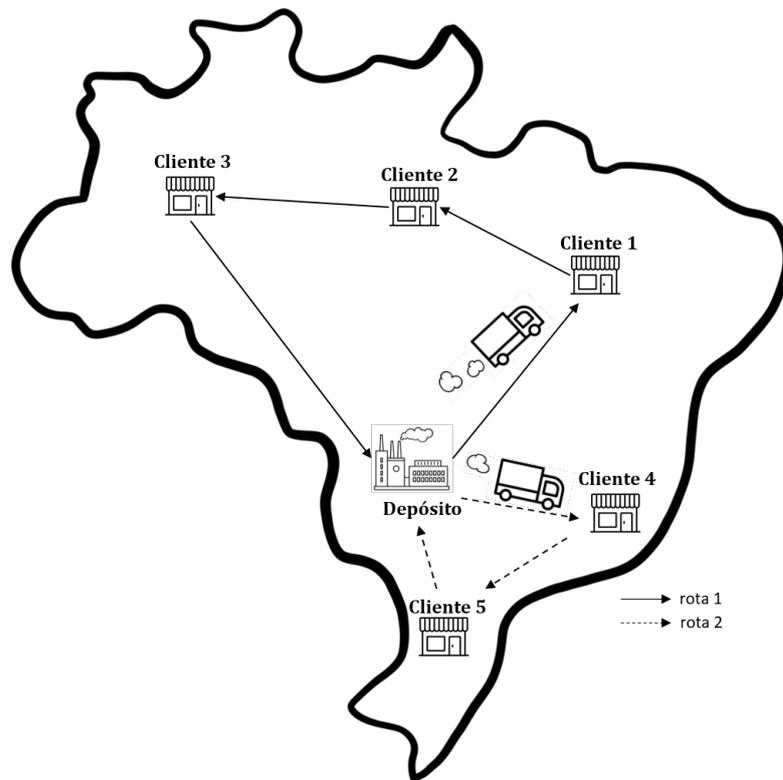
Distribuição de Produtos

Finalizada a embalagem, os materiais são coletados, carregados e distribuídos aos clientes. Cada cliente pode solicitar diversos produtos, e estes devem ser coletados no armazém, nesta etapa são coletados kit's que englobam todos os componentes de um produto final. Para que sejam poupadas operações desnecessárias os kit's devem ser carregados considerando a ordem de roteamento, a fim de facilitar o descarregamento ao longo das rotas. O processo de distribuição possui várias etapas como apresentado na figura 8, com a coleta dos produtos no armazém, carregamento dos veículos, que podem ser de uma frota heterogênea ou homogênea, e entrega aos clientes em determinada rota. Na figura 10 temos uma ilustração de como se dá o roteamento. Temos um depósito único que atende todos os clientes em diferentes rotas, na figura temos duas rotas, uma é do depósito para o cliente 1, cliente 2, cliente 3 e voltando ao depósito e a outra é do depósito ao cliente 4, cliente 5 e voltando ao depósito.

Aspectos importantes a serem considerados na definição das rotas são o atendimento dentro das janelas de tempo, onde qualquer entrega após o horário de encerramento deve ser feito na próxima abertura de janela, e cumprimento dos prazos de entrega. Este atendimento dentro do prazo representa o nível de serviço ao cliente. Um ponto importante é que as rotas são de longa duração e se estendem por vários períodos em longas distâncias.

Uma característica importante deste ramo industrial é que o carregamento dos veículos é feito com o estoque disponível ao fim do período anterior, uma vez que há processos de inspeção e embalagem que devem ocorrer antes da distribuição. Portanto, os veículos devem ser carregados apenas utilizando o estoque do período anterior e não podem contar com itens produzidos no mesmo período. Tudo que é produzido em determinado período só se torna disponível no período posterior. Logo, no primeiro período não haverá

Figura 10 – Ilustração do roteamento para o cenário proposto



distribuição.

Neste cenário cada veículo pode realizar mais de uma viagem dentro do planejamento, podendo um veículo sempre estar em roteamento ou em determinados períodos permanecer ocioso. A entrega pode ser fracionada ou atendida em uma entrega, no entanto, nesta dissertação consideraremos apenas entregas em uma única vez, pois muitos clientes preferem receber toda demanda em uma única entrega.

Os clientes geralmente são em centros de distribuição de lojas de varejo, portanto, essas empresas geralmente constituem um negócio B2B (*business to business*). Devido a localização geográfica dos centros de distribuição, as rotas são caracterizadas por serem longas para o atendimento nacional.

Os veículos utilizados são caminhões, onde o porte pode variar dependendo da frota, e tradicionalmente são utilizados veículos que utilizam combustível fóssil, como o diesel, que em sua queima emite gás carbônico. Para as organizações com rotas longas um dos principais impactos no roteamento é o gasto de combustível.

Integração de produção e roteamento

Em geral as fábricas são responsáveis não apenas pela produção, mas também pela entrega dos pedidos. A responsabilidade pelas duas etapas implica em um planejamento mais complexo para a fábrica que, por outro lado, dá oportunidade de melhoria na cadeia

produtiva pois facilita a tomada de decisões de forma integrada e simultânea. Considerar o planejamento da produção e o roteamento de veículos de forma integrada para a indústria de móveis reflete em um ganho médio de 6% na redução de custos (MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019).

3.2 Descrição do Problema

Observando os processos descritos na subseção anterior notamos que há dois problemas a serem resolvidos, a programação da produção e o roteamento de veículos. Em cada um há um conjunto de decisões a serem tomadas levando em consideração varias restrições e o critério de minimização de custos. Queremos construir e validar um modelo matemático que otimize a produção, o roteamento de veículos de forma integrada e que tenha como critério a minimização dos custos de inventário, *setup*, gasto de combustível e a emissão de gás carbônico na indústria de móveis.

Conforme descrito, na fabricação de móveis de aço são produzidos componentes de produtos finais que possuem uma armazenagem intermediária e são entregue aos clientes na forma de kit's, que compõem os produtos finais. A produção é limitada pelo tempo disponível. Cada componente toma um tempo de produção e a soma dos tempos dos itens produzidos consome essa capacidade de tempo disponível de produção. Na produção há a necessidade do preparo de linha para cada componente para a etapa de pintura e com a troca de componente ocorre o *setup* da linha de produção, que também consome o tempo disponível de produção. Devido a esta complexidade há necessidade da definição do sequenciamento de produção em função da otimização destas trocas.

É necessário que seja realizado o atendimento total da demanda dos clientes no prazo de entrega e nas janelas de tempo definidos pelos clientes, e cada cliente só pode ser visitado uma vez (entregas não fracionadas). Para isto estoques são permitidos, que são utilizados no inicio de cada período do horizonte de planejamento. Também é considerado um estoque mínimo para cada componente. É considerado um único depósito que atende a diversos clientes. Os veículos saem do depósito e voltam ao depósito realizando rotas que podem passar por um cliente ou mais, há uma frota com uma quantidade determinada de veículos. Cada rota começa e termina em períodos que não precisam ser o mesmo. A minimização da emissão de carbono é realizada nas etapas de roteamento dos veículos e consideram a carga carregada, a velocidade dos veículos e a distância percorrida. Já o roteamento de veículos é capacitado em relação ao peso dos produtos que o caminhão consegue carregar.

Considerando o cenário da indústria de móveis proposto neste capítulo, as decisões a serem tomadas do problema integrado do planejamento da distribuição e do roteamento considerando a emissão de carbono, são:

- Quais as quantidades de produtos à serem produzidas? Em quais períodos? Em qual sequência? Considerando o atendimento total da demanda, dentro do prazo e janelas de tempo estabelecidos pelos clientes.
- Qual nível de estoque manter em cada período para cada componente?
- Quais rotas serão realizadas em cada período? Quais clientes atender nessas rotas? Quanto de carga levar em cada rota? Considerando o menor gasto de energia e o impacto da carga na emissão de combustível.
- Quais velocidades adotar em cada arco percorrido?
- Quais janelas de tempo iniciar cada rota e atender cada cliente nas rotas definidas?

3.3 Modelo CarbonLSMVRP

O modelo proposto por esta dissertação é apresentado a seguir, denominado CarbonLSMVRP. O modelo utiliza como referência o modelo *Lot-scheduling multi-vehicle routing problem* (LSMVRP), (MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019; MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2018) que descreve os processos planejamento de produção e roteamento integrados aplicados à indústria de móveis e os modelos de Demir et al. (2012) e Qiu et al. (2020) que descrevem um modelo de cálculo de redução da emissão de carbono, baseado no consumo de combustível.

Na tabela 7 são apresentados os conjuntos e índices utilizados no modelo CarbonLSMVRP. Na tabela 8 estão apresentados os parâmetros e variáveis utilizados no modelo CarbonLSMVRP.

Tabela 7 – Conjuntos e Índices do modelo CarbonLSMVRP

Conjuntos	
C	Conjunto de componentes.
P	Conjunto de produtos finais.
T	Conjunto de períodos no horizonte de planejamento.
N	Conjunto de nós, incluindo clientes e o depósito.
Co	Conjunto N sem considerar o depósito.
A	Conjunto de arcos.
V	Conjunto de veículos.
R	Conjunto de rotas.
VEL	Conjunto de velocidades que podem ser adotadas pelos veículos.
Índices	
a,b	Componente.
p	Produto final.
t	Período.
i,j	Nós que representam clientes e depósito, onde 0 e n+1 são o depósito.
v	Veículo.
r, s	Rota.
vel	Velocidade.

Tabela 8 – Parâmetros e variáveis do modelo CarbonLSMVRP

Parâmetro	Produção
\hat{c}_{ab}	Custo de <i>setup</i> do componente <i>a</i> para o componente <i>b</i> .
h_a	Custo de inventário do componente <i>a</i> .
η_{ap}	Quantidade de unidades do componente <i>a</i> para produzir uma unidade do produto <i>p</i> .
I_a^{min}	Inventário mínimo do componente <i>a</i> .
ζ_{ab}	Unidade de tempo para troca de produção do componente <i>a</i> para <i>b</i> .
K_t	Capacidade de produção no período <i>t</i> .
\bar{M}_{at}	Um número suficientemente grande, $\bar{M}_{at} = \min\{\frac{K_t}{\rho_a}, \sum_{i \in \bar{C}} \sum_{p \in P} \eta_{ap} d_{pi}\}$.
ρ_a	Tempo consumido para produção de uma unidade do componente <i>a</i> .
d_{pi}	Demanda do produto <i>p</i> no cliente <i>i</i> .
Parâmetro	Transporte
θ_v	Capacidade de carga do veículo <i>v</i> .
φ_p	Peso do produto <i>p</i> .
$\delta_{it}, \bar{\delta}_{it}$	Janelas de tempo de chegada e saída do cliente <i>i</i> no período <i>t</i> .
λ	Tempo de carga/descarga por unidade de peso.
M_{ij}	Um número suficientemente grande, $M_{ij} = \Delta_i + \lambda(\sum_{i \in N} \sum_{p \in P} d_{pi})$.
Δ_i	Prazo de entrega pré-estabelecido do cliente <i>i</i> .
\bar{k}	Fator de fricção do motor do veículo.
\bar{N}	Velocidade do motor do veículo.
\bar{V}	Deslocamento do motor do veículo.
\bar{d}_{ij}	Distância do nó <i>i</i> ao nó <i>j</i> .
\bar{v}^{vel}	Velocidade do veículo sob a velocidade <i>vel</i> .
\bar{w}	Peso do veículo descarregado.
p_f	Preço do combustível por litro.
\bar{e}	Fator de emissão de carbono.
p_c	Preço do carbono por kg de CO_2 emitido.
λ	Função = $\xi/\kappa\psi$
ξ	Relação de massa de combustível-ar.
κ	Valor de aquecimento de um combustível diesel típico.
ψ	Fator de conversão de gramas para litros.
$\bar{\gamma}$	Função = $1/1000\varepsilon\varpi$
ε	Eficiência do trem de força do veículo.
ϖ	Parâmetro de eficiência para motores a diesel de um veículo .
$\bar{\alpha}$	Função = $\bar{r} + \bar{g} \sin\theta + \bar{g} C_r \cos\theta$
\bar{r}	Aceleração do veículo.
\bar{g}	Gravidade.
$\bar{\theta}$	Ângulo de inclinação da estrada.
C_r	Coefficiente de resistência ao rolamento do veículo.
β	Função = $0,5C_dA\rho$
C_d	Coefficiente de arrasto aerodinâmico do veículo.
\bar{A}	Área frontal do veículo.
ρ_{ar}	Densidade do ar.
Variáveis	Produção
x_{at}	Quantidade de itens <i>a</i> produzidas no período <i>t</i> .
I_{at}	Quantidade de itens <i>a</i> estocadas ao fim do período <i>t</i> .
z_{abt}	Igual a 1 se há <i>setup</i> de <i>a</i> para <i>b</i> no período <i>t</i> , caso contrário é 0.
y_{at}	Igual a 1 a linha esta preparada para produção do item <i>a</i> no período <i>t</i> , caso contrário é zero.
π_{at}	Variável auxiliar para o sequenciamento do item <i>a</i> no período <i>t</i> .
Variáveis	Transporte
μ_{ir}	Tempo no qual o nó <i>i</i> inicia a ser atendido na rota <i>r</i> .
Q_{prt}	Quantidade de produtos <i>p</i> enviada na rota <i>r</i> durante o período <i>t</i> .
f_{ijr}	Carga transportada no arco (i, j) na rota <i>r</i> , cada arco (i, j) é associado a apenas uma rota.
w_{ijr}	Igual a 1 se na rota <i>r</i> o arco (i, j) é percorrido, caso contrário é zero.
ϕ_{irt}	Igual a 1 se o nó <i>i</i> é visitado pela rota <i>r</i> no período <i>t</i> , caso contrario é zero.
α_{rv}	Igual a 1 se a rota <i>r</i> é feita pelo veículo <i>v</i> , caso contrario é zero.
l_{ijr}^{vel}	Igual a 1 se no arco (i, j) na rota <i>r</i> o veículo adota a velocidade <i>v</i> , caso contrario é 0.

A função objetivo do modelo é definida pela fórmula 3.1, onde os dois primeiros termos descrevem respectivamente os custos de inventário e *setup*, e os quatro termos seguintes são relacionados a distribuição, considerando o custo de combustível e carbono. A metodologia utilizada para a inserção de carbono foi a de Betkas e Laporte (2011), utilizando a função descrita por Demir et al. (2012), os detalhes da composição dos termos de roteamento foram descritos na subseção 2.3.1. Na função 3.1 há chaves que indicam o

que cada termo representa.

$$\begin{aligned}
& \min \underbrace{\sum_{a \in C} \sum_{t \in T} h_a I_{at}}_{\text{Inventário}} + \underbrace{\sum_{a \in C} \sum_{b \in C} \sum_{t \in T} \hat{c}_{ab} z_{abt}}_{\text{Setup}} \\
+ & \underbrace{(p_f + \bar{e} p_c)}_{\text{Taxas Dos Custos}} \left(\underbrace{\sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{k} \bar{N} \bar{V} \bar{d}_{ij} \sum_{vel} l_{ijr}^{vel} / \bar{v}^{vel}}_{\text{Resistência Motor}} + \underbrace{\sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{w} \bar{\alpha}_{ij} \bar{d}_{ij} \bar{\gamma} w_{ijr}}_{\text{Peso Veículo}} \right) \\
& + \underbrace{\sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{\alpha}_{ij} \bar{d}_{ij} \bar{\gamma} f_{ijr}}_{\text{Carga}} + \underbrace{\sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{\beta} \bar{d}_{ij} \bar{\gamma} \sum_{vel} l_{ijr}^{vel} (\bar{v}^{vel})^2}_{\text{Resistência Do Ar}}
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Restrições relacionadas principalmente à produção

Em 3.2 é estabelecido o balanceamento de estoque do componente a no período t . O estoque do componente a do período anterior mais a quantidade produzida no período atual devem ser iguais a demanda a ser atendida mais o estoque ao final do período, garantindo assim que a quantidade produzida em todos os períodos atende a demanda total. Importante ressaltar que o termo $\sum_{r=1}^R \sum_{p \in P} \eta_{ap} Q_{prt}$ traduz a demanda de produtos, representada por Q_{prt} , para componentes através do parâmetro η_{ap} que é a relação de quantidade de unidades do componente a para produzir uma unidade do produto p .

$$\begin{aligned}
\underbrace{I_{a,t-1}}_{\text{Estoque do período anterior}} + \underbrace{x_{at}}_{\text{Quantidade produzida}} &= \underbrace{\sum_{r=1}^R \sum_{p \in P} \eta_{ap} Q_{prt}}_{\text{Demanda a ser atendida}} + \underbrace{I_{at}}_{\text{Estoque atual}} \\
a \in C, t \in T.
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Em 3.3 é estabelecido que o estoque formado no final do período $t-1$ é maior que a demanda do período t . Isso porque a demanda será suprida pelo estoque do período anterior, característica da indústria de móveis pois as entregas são iniciadas no começo do dia e a distribuição é feita com o estoque do período anterior $I_{a,t-1}$. Essa restrição indica que tudo que for atendido no período atual deverá ser retirado do inventário do período anterior.

$$\begin{aligned}
\underbrace{I_{a,t-1}}_{\text{Estoque do período anterior}} &\geq \underbrace{\sum_{r=1}^R \sum_{p \in P} \eta_{ap} Q_{prt}}_{\text{Demanda a ser atendida}} \quad a \in C, t \in T.
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Em 3.4 é imposto um nível de estoque mínimo para cada componente a dentro de cada período t . Esta restrição é definida devido à prática comum nas empresas de se definir um estoque mínimo I_a^{min} para os componentes, para atender demandas inesperadas, atuando como um estoque de segurança.

$$\begin{aligned}
\underbrace{I_{at}}_{\text{Estoque do período atual}} &\geq \underbrace{I_a^{min}}_{\text{Nível de estoque mínimo para cada componente}} \quad a \in C, t \in T.
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Em 3.5 é definida a restrição de capacidade da linha de produção em cada período t . A capacidade de produção (K_t) se dá por unidades de tempo e é consumida pelo tempo de produção dos itens $\sum_{a \in C} \rho_a x_{at}$ somado ao tempo de troca de um item a para um item b ($\sum_{a \in C} \sum_{b \in C} \zeta_{ab} z_{abt}$). Nesta restrição 3.5 o tempo de produção dos lotes de itens é a multiplicação da quantidade de componentes a produzidos x_{at} pelo tempo ρ_a gasto para produzir uma unidade do componente a . Já o tempo de *setup* é dado pela multiplicação da quantidade do tempo ζ_{ab} gasto para cada troca de um item a para b , pela variável binária z_{abt} que é 1 se ocorre a troca e 0 caso o contrário.

$$\underbrace{\sum_{a \in C} \rho_a x_{at}}_{\text{Tempo dos itens produzidos}} + \underbrace{\sum_{a \in C} \sum_{b \in C} \zeta_{ab} z_{abt}}_{\text{Tempo dos setups}} \leq \underbrace{K_t}_{\text{Capacidade de produção}} \quad t \in T. \quad (3.5)$$

Em 3.6 a restrição garante que só há x_{at} itens a produzidos no período t se:

- A linha inicia o período t configurada para o item a com $y_{at} = 1$, ou;
- Há troca de um item b para o item a naquele período com $\sum_{b \in C} z_{bat} = 1$.

Se nenhum dos dois ocorrer, então $y_{at} + \sum_{b \in C} z_{bat} = 0$, logo x_{at} deverá ser 0 e não há produção do componente a . Também estabelece um limitante superior ($\bar{M}_{at} = \min\{\frac{K_t}{\rho_a}, \sum_{i \in \bar{C}} \sum_{p \in P} \eta_{ap} d_{pi}\}$) da quantidade máxima que pode ser produzida.

$$\underbrace{x_{at}}_{\text{Quantidade produzida}} \leq \bar{M}_{at} \left(\underbrace{y_{at}}_{\text{Linha configurada para o item } a} + \underbrace{\sum_{b \in C} z_{bat}}_{\text{Troca do item } b \text{ para } a} \right) \quad a \in C, t \in T. \quad (3.6)$$

Na restrição 3.7 é estabelecido que a linha de produção sempre está configurada para produção de um único item a no início de cada período t . Isto quer dizer que a linha de produção sempre está configurada para determinado componente, possibilitando o *setup carryover*, onde se ao final período t a linha estiver configurada para o item a e não houver troca para um componente b , no início do período $t + 1$ ela continuará configurada para o item a .

$$\underbrace{\sum_{a \in C} y_{at}}_{\text{Linha configurada para o item } a} = 1 \quad t \in T. \quad (3.7)$$

Em 3.8 é estabelecido o balanceamento do fluxo, relacionando a configuração inicial da linha de produção (y_{at}) à troca de componente (z_{abt}) em um período t . Neste caso temos as possibilidades abaixo:

- Se a linha inicialmente estiver configurada para o item a , temos $y_{at} = 1$, se não houver trocas no período t , então temos $\sum_{b \in C} z_{bat} = 0$ e $\sum_{b \in C} z_{abt} = 0$. Ou seja, a linha se mantém preparada com o item a no período seguinte $t + 1$, e temos $y_{a,t+1} = 1$.

- Outra possibilidade é a linha começar configurada para o item a , com $y_{at} = 1$ e depois produz o item b , então temos $\sum_{b \in C} z_{abt} = 1$. Se a linha não voltar produzir o item a , temos então $y_{a,t+1} = 0$ e $\sum_{b \in C} z_{abt} = 0$.
- Se a linha não iniciou com o item a ($y_{at} = 0$) e ocorrer a troca do item b para o item a no período t , temos $\sum_{b \in C} z_{bat} = 1$. Se não houver troca do item a para outro item b teremos $y_{a,t+1} = 1$ e $\sum_{b \in C} z_{abt} = 0$.
- Temos o caso $\sum_{b \in C} z_{bat} = 1$ ($y_{at} = 0$) e $\sum_{b \in C} z_{abt} = 1$ ($y_{a,t+1} = 0$). Neste caso a linha de produção começa em b e tem a troca para a e tem a troca de a para um item b novamente, não iniciando nenhum período com a .
- Outro caso é caso a linha comece em a ($y_{at} = 1$), ocorra a troca para b $\sum_{b \in C} z_{abt} = 1$ e dentro do mesmo período troque para a novamente $\sum_{b \in C} z_{bat} = 1$, começando o período seguinte em a ($y_{a,t+1} = 1$).
- E para finalizar caso a linha não inicie em a ($y_{at} = 0$) e não houve trocas para a , então $\sum_{b \in C} z_{bat} = 0$ e $\sum_{b \in C} z_{abt} = 0$. Significa que não há preparo do item a no período t , e que não poderá iniciar configurado no período $t + 1$, logo $y_{a,t+1} = 0$.

$$\begin{array}{rcl}
\underbrace{y_{at}} & + & \underbrace{\sum_{b \in C} z_{bat}} \\
\text{1 se a linha inicia configurada para o item a no período } t & & \text{Se há uma troca de b para a no período } t \\
\underbrace{y_{a,t+1}} & + & \underbrace{\sum_{b \in C} z_{abt}} \\
\text{1 se a linha inicia configurada para o item a no período } t+1 & & \text{Se há uma troca de a para b no período } t \\
& & a \in C, t \in T.
\end{array} \quad (3.8)$$

Em 3.9 a restrição evita subciclos, pois define o sequenciamento de produção no período t , onde π_{at} indica a posição do item a na sequencia de produção. Neste caso, se houver troca de um componente b para a temos $z_{bat} = 1$, então $|C|(1 - z_{bat}) = 0$, logo temos que $\pi_{at} \geq \pi_{bt} + 1$. Quanto maior o valor de π_{at} , mais para o final na sequencia de produção o item a é alocado. Esta restrição junto com a restrição 3.8 definem qual a ordem das trocas dos componentes b para a sem que haja subciclos.

$$\begin{array}{rcl}
\underbrace{\pi_{at}} & \geq & \underbrace{\pi_{bt}} + 1 - \underbrace{|C|(1 - z_{bat})} \\
\text{Posição do componente } a \text{ no período } t & & \text{Posição do componente } b \text{ no período } t \quad \text{0 se há troca do item } b \text{ para } a \\
& & a \in C, b \in C, t \in T.
\end{array} \quad (3.9)$$

Restrições relacionadas principalmente ao roteamento

Em 3.10 e 3.11 as restrições garantem respectivamente que toda rota r deve sair do nó 0 (depósito) e terminar no nó $n+1$ (depósito). As rotas que viajam apenas do nó 0 para o nó $n+1$, sem passar em algum cliente são rotas vazias. Conforme mencionado

anteriormente, há apenas um depósito que é o ponto de abastecimento dos veículos, por isso todas as rotas devem sair e voltar para ele.

$$\underbrace{\sum_{j \in \bar{C} \cup \{n+1\}} w_{0jr}}_{\text{Rotas que saem do depósito 0}} = 1 \quad r = 1, \dots, R. \quad (3.10)$$

$$\underbrace{\sum_{i \in \bar{C} \cup \{0\}} w_{i(n+1)r}}_{\text{Rotas que voltam ao depósito n+1}} = 1 \quad r = 1, \dots, R. \quad (3.11)$$

Em 3.12 a restrição assegura a conservação do fluxo nos nós. Isto é, toda rota onde há um arco (j, i) percorrido em uma rota r ($w_{jir} = 1$), o veículo deve sair de j , que pode ser um cliente ou o depósito inicial, para um próximo nó, que pode ser outro cliente ou o depósito quando terminando a rota r ($w_{jir} = 1$). O mesmo vale caso um arco (i, j) não tenha sido percorrido ($w_{ijr} = 0$) até um nó j em uma rota r , não há necessidade de se ter uma arco partindo de j ($w_{jir} = 0$) em uma rota r .

$$\underbrace{\sum_{j \in \bar{C} \cup \{0\}} w_{jir}}_{\text{Arco percorrido de } j \text{ até um próximo nó } i} = \underbrace{\sum_{j \in \bar{C} \cup \{n+1\}} w_{ijr}}_{\text{Arco percorrido de } i \text{ até } j} \quad i \in \bar{C}, r = 1, \dots, R. \quad (3.12)$$

Em 3.13 é garantido que cada cliente j será visitado exatamente uma vez o que implica que não haverá entregas parciais. Importante ressaltar que a visita de um arco (i, j) está alocada a apenas uma rota r .

$$\underbrace{\sum_{i \in \bar{C} \cup \{0\}} \sum_{r=1}^R w_{ijr}}_{\text{Visita ao cliente } j} = 1 \quad j \in \bar{C}. \quad (3.13)$$

Em 3.14 é feita uma ordenação na escolha de rotas e reduz o número de possibilidades de roteamento, ou seja, faz uma quebra da simetria nas soluções. Esta restrição implica que, uma rota $r + 1$ só pode ser utilizada e partir do depósito se uma rota r anterior for utilizada, pois se $\sum_{i \in \bar{C}} w_{0i(r+1)} > 0$, então $\sum_{i \in \bar{C}} w_{0ir} > 0$. Essa restrição tem objetivo de não deixar que rotas ociosas ocorram entre rotas ativas.

$$\underbrace{\sum_{i \in \bar{C}} w_{0ir}}_{\text{Saída do depósito na rota } r} \geq \underbrace{\sum_{i \in \bar{C}} w_{0i(r+1)}}_{\text{Saída do depósito na rota } r+1} \quad r = 1, \dots, R - 1. \quad (3.14)$$

Em 3.15 é definido se não há rota ($\phi_{0rt} = 0$) então não há carga ($Q_{prt} = 0$). O inverso também é válido, se há carga ($Q_{prt} > 0$) então a rota deve estar ativa ($\phi_{0rt} > 0$). Além disso, a restrição define que a carga máxima que pode ser levada é limitada pelo

menor valor entre a demanda total de produtos p e a capacidade do veículo v .

$$\underbrace{Q_{prt}}_{\text{Qtd. de produtos } p \text{ na rota } r \text{ no período } t} \leq \underbrace{\min\left\{\left\lfloor \frac{\text{max}\theta_v}{\varphi_p} \right\rfloor, \sum_{i \in C} d_{pi}\right\}}_{\text{Limitante superior}} \underbrace{\phi_{0rt}}_{1 \text{ há saída do depósito}} \quad (3.15)$$

$$p \in P, r = 1, \dots, R, t \in T.$$

Em 3.16 é definida a quantidade de produto p que deve ser enviada para atender a demanda na rota r , através da variável Q_{prt} . Para isto são somadas todas as demandas de produtos d_{pi} nos clientes que pertencem a mesma rota r . Note que esses valores de demanda só são considerados se o cliente é associado a rota pela variável w_{ijr} . Essa restrição é importante por definir que toda a demanda d_{pi} deverá ser atendida, sem a possibilidade de perder alguma quantidade de venda.

$$\underbrace{\sum_{t \in T} Q_{prt}}_{\text{Qtd. de produtos } p \text{ carregados na rota } r} = \underbrace{\sum_{i \in C} d_{pi}}_{\text{Demanda dos produtos no cliente } i} \left(\underbrace{\sum_{j \in \bar{C} \cup \{n+1\}} w_{ijr}}_{1 \text{ se o arco } (i, j) \text{ é percorrido}} \right) \quad (3.16)$$

$$p \in P, r = 1, \dots, R.$$

Em 3.17 é estabelecido que todo arco que é percorrido de i até j em uma rota r , representado pela variável w_{ijr} , deve ser percorrido em um período t , representado pela variável ϕ_{irt} . Esta restrição relaciona o arco (i, j) em uma rota r ao período t .

$$\underbrace{\sum_{t \in T} \phi_{irt}}_{1 \text{ se o nó } i \text{ é visitado pela rota } r \text{ no período } t} = \underbrace{\sum_{j \in \bar{C} \cup \{n+1\}} w_{ijr}}_{1 \text{ se o arco } (i, j) \text{ é percorrido na rota } r} \quad i \in \bar{C}, r = 1, \dots, R. \quad (3.17)$$

Em 3.18 é definido que se uma rota tem um único nó com início e término no depósito, isto é, $w_0(n+1)r = 1$, então $\sum_{t \in T} \phi_{0rt} = 0$, logo, não precisa ser alocada a um período.

$$\sum_{t \in T} \phi_{0rt} = \underbrace{1 - w_0(n+1)r}_{0 \text{ se o arco } (0, n+1) \text{ é percorrido}} \quad r = 1, \dots, R. \quad (3.18)$$

Na restrição 3.19 é definido que se uma rota r sai do depósito em um período t , ela deve voltar ao depósito em algum período que não precisa ser o mesmo, ou seja, embora a rota r seja a mesma, a partida e a chegada ao depósito podem ser em períodos diferentes.

$$\underbrace{\sum_{t \in T} \phi_{0rt}}_{\text{Partida do depósito na rota } r \text{ em um período } t} = \underbrace{\sum_{t \in T} \phi_{(n+1)rt}}_{\text{Chegada ao depósito na rota } r \text{ em um período } t} \quad r = 1, \dots, R. \quad (3.19)$$

Em 3.20 são estabelecidas as janelas de tempo. Elas são ativadas apenas se o nó i é visitado pela rota r no período t , pois se $\phi_{irt} = 0$, então $\mu_{ir} = 0$. Neste caso a janela de

tempo inicial é dada por δ_{it} , que é quando os caminhões podem começar a descarregar as cargas nos clientes e a janela de tempo final é $\bar{\delta}_{it}$, que é o horário limite para serem realizadas as descargas nos clientes. O horário de visita μ_{ir} deve estar entre esses dois limites nas janelas de tempo.

$$\underbrace{\sum_{t \in T} \delta_{it} \phi_{irt}}_{\text{Horário de início da janela de tempo}} \leq \underbrace{\mu_{ir}}_{\text{Horário de visita ao nó } i} \leq \underbrace{\sum_{t \in T} \bar{\delta}_{it} \phi_{irt}}_{\text{Horário final da janela de tempo}} \quad (3.20)$$

$i \in N, r = 1, \dots, R.$

Em 3.21 são definidos limitantes inferiores em relação ao tempo de atendimento do cliente i . Esta restrição define que o tempo de chegada no primeiro cliente μ_{jr} é a soma do horário de partida do depósito μ_{0r} , adicionado ao tempo de carregamento do veículo $\sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \varphi_p Q_{prt}$ e adicionado também ao tempo de deslocamento $\sum_{vel} (\bar{d}_{0j} / \bar{v}^{vel}) l_{0jr}^{vel}$ até o cliente j . Neste caso se o arco $(0, j)$ é ativo na rota r , então $w_{0jr} = 1$ e $M_{0j}(1 - w_{0jr}) = 0$, não afetando a restrição, caso $(0, j)$ não seja ativo na rota r , então $w_{0jr} = 0$, logo M_{0j} , que é um número grande, torna a restrição redundante pois $\mu_{jr} \geq 0$.

$$\underbrace{\mu_{jr}}_{\text{Tempo do início do atendimento do nó } j \text{ na rota } r} \geq \underbrace{\mu_{0r}}_{\text{Horário de saída do depósito}} + \underbrace{\lambda \left(\sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \varphi_p Q_{prt} \right)}_{\text{Tempo de carregamento do veículo}} + \underbrace{\sum_{vel} (\bar{d}_{0j} / \bar{v}^{vel}) l_{0jr}^{vel}}_{\text{Tempo de deslocamento no arco } (0, j)} - \underbrace{M_{0j}(1 - w_{0jr})}_{\text{Um número grande se o arco } 0, j \text{ não é ativo na rota } r}$$

$j \in \bar{C}, r = 1, \dots, R.$ (3.21)

A restrição 3.22 determina o limitante inferior para os demais arcos que se aplicam a cada rota, incluindo a volta ao depósito. Isto é, é a restrição responsável por calcular o tempo de atendimento μ_{jr} de um nó j , considerando o horário de saída μ_{ir} de um nó anterior i , para um arco (i, j) . Para isto são somados o tempo de carregamento do veículo $\lambda(\sum_{p \in P} \varphi_p d_{pi})$ e também o tempo de deslocamento $\sum_{vel} (\bar{d}_{ij} / \bar{v}^{vel}) l_{ijr}^{vel}$ do nó i até o nó j . Esta restrição só é ativada quando o arco (i, j) é percorrido na rota r e, portanto, $w_{ijr} = 1$, $M_{ij}(1 - w_{ijr}) = 0$, caso contrário, $M_{ij}(1 - w_{ijr}) = M_{ij}$ e a restrição se torna redundante.

$$\underbrace{\mu_{jr}}_{\text{Tempo do início do atendimento do nó } j \text{ na rota } r} \geq \underbrace{\mu_{ir}}_{\text{Horário de saída do nó } i} + \underbrace{\lambda \left(\sum_{p \in P} \varphi_p d_{pi} \right)}_{\text{Tempo de carregamento do veículo}} + \underbrace{\sum_{vel} (\bar{d}_{ij} / \bar{v}^{vel}) l_{ijr}^{vel}}_{\text{Tempo de deslocamento no arco } (i, j)} - \underbrace{M_{ij}(1 - w_{ijr})}_{\text{Um número grande se o arco } i, j \text{ não é ativo na rota } r}$$

$\forall i \in \bar{C}, j \in \bar{C} \cup \{n + 1\}, r = 1, \dots, R : i \neq j.$ (3.22)

Em 3.23 é garantido que cada cliente deve ser atendido dentro do prazo de entrega estabelecido, isto ocorre pois o horário de visita μ_{ir} deverá ser menor ou igual ao prazo de

entrega estabelecido Δ_i .

$$\underbrace{\mu_{ir}}_{\text{Horário de visita ao nó } i} \leq \underbrace{\Delta_i}_{\text{Prazo de entrega do cliente } i} \underbrace{\sum_{\substack{j \in CU\{n+1\} \\ \text{1 se o arco } (i,j) \text{ é percorrido}}} w_{ijr}}_{\text{1 se o arco } (i,j) \text{ é percorrido}} \quad i \in \bar{C}, r = 1, \dots, R. \quad (3.23)$$

Na restrição 3.24 é garantido que cada rota utilizada é alocada a um veículo único. Se uma rota não é utilizada, então $\sum_{t \in T} \phi_{0rt} = 0$ e para ela não é alocado um veículo.

$$\underbrace{\sum_{v \in V} \alpha_{rv}}_{\text{1 se o veículo } v \text{ esta alocado à rota } r} = \underbrace{\sum_{t \in T} \phi_{0rt}}_{\text{1 se há saída do depósito na rota } r \text{ no período } t} \quad r = 1, \dots, R. \quad (3.24)$$

A restrição 3.25 assegura que uma determinada rota s só sai do depósito após o término de outra, em rotas realizadas pelo mesmo veículo v . Isto por que, se o mesmo veículo esta em duas rotas r e s , em que $\alpha_{rv} = 1$ e $\alpha_{sv} = 1$, então $(2 - \alpha_{rv} - \alpha_{sv}) = 0$, logo é necessário que a saída do depósito da rota s seja após a chegada no depósito da rota r , $\mu_{0s} \geq \mu_{(n+1)r}$, considerando que $s > r$.

$$\underbrace{\mu_{0s}}_{\text{Saída do depósito da rota } s} \geq \underbrace{\mu_{(n+1)r}}_{\text{Volta ao depósito da rota } r} - \underbrace{\bar{\delta}_{(n+1)|T|}(2 - \alpha_{rv} - \alpha_{sv})}_{\text{0 se o veículo } v \text{ esta alocado na rota } r \text{ e } s} \quad (3.25)$$

$v \in V, r, s = 1, \dots, R : r < s.$

Em 3.26 é garantido que a carga $\sum_{p \in P} \varphi_p(\sum_{t \in T} Q_{prt})$ de todos produtos p carregada por um veículo v em uma rota r não exceda a capacidade do veículo θ_v . A variável α_{rv} é responsável por tornar a restrição válida apenas se o veículo v percorre a rota r .

$$\underbrace{\sum_{p \in P} \varphi_p(\sum_{t \in T} Q_{prt})}_{\text{Quantidade de carga carregada na rota } r} \leq \underbrace{\sum_{v \in V} \theta_v \alpha_{rv}}_{\text{Capacidade do veículo } v \text{ se percorrer a rota } r} \quad r = 1, \dots, R. \quad (3.26)$$

Restrições relacionadas à emissão de carbono

A restrição 3.27 é responsável por selecionar uma velocidade vel dentro do conjunto VEL para percorrer um arco (i, j) , esta seleção é feita pela variável l_{ijr} . Esta definição da variável só ocorre quando um arco (i, j) é percorrido em uma rota r , onde $w_{ijr} = 1$. Esta restrição é essencial para a linearização da seleção da velocidade para considerarmos seu impacto na emissão de gás carbônico, ao observarmos a fórmula 3.1 vemos que a velocidade é elevada ao quadrado e, por isto, se a velocidade for uma variável a equação se torna não-linear. Desta forma a velocidade é definida como um parâmetro que varia dentro de um conjunto VEL e é selecionada pela variável binária l_{ijr} . Esta restrição também define

que apenas uma velocidade pode ser selecionada.

$$\underbrace{\sum_{vel}^{VEL} l_{ijr}^{vel}}_{1 \text{ se a velocidade } vel \text{ for selecionada no arco } (i, j) \text{ na rota } r} = \underbrace{w_{ijr}}_{1 \text{ se o arco } (i, j) \text{ for percorrido na rota } r} \quad (3.27)$$

$$\forall i, j \in N, r = 1, \dots, R.$$

A restrição 3.28 garante que a carga total do veículo $Q_{prt}\varphi_p$ na saída do depósito é igual a soma das cargas de todos clientes que fazem parte da rota $\sum_{j \in C} f_{0jr}$. A carga inicial f_{0jr} contém o peso de todos produtos que serão distribuídos na rota r . O parâmetro φ_p transforma o termo $\sum_{p \in P} \sum_{t \in T} Q_{prt}\varphi_p$ em peso, para igualar a unidade de medida da carga.

$$\underbrace{\sum_{p \in P} \sum_{t \in T} Q_{prt}\varphi_p}_{\text{Peso das cargas carregadas na saída do depósito}} = \underbrace{\sum_{j \in C} f_{0jr}}_{\text{Pesos das cargas dos clientes que fazem parte da rota } r} \quad (3.28)$$

$$r = 1, \dots, R.$$

A restrição 3.29 define que a carga carregada em um arco (i, j) é maior ou igual a demanda de todos produtos p no ponto j , em unidades de peso. Note que se o veículo não percorre o arco (i, j) na rota r , então $w_{ijr} = 0$, logo a carga poderá ser maior ou igual a zero. Como estamos falando de uma função objetivo de minimização, e a carga impacta diretamente nos custos, se $w_{ijr} = 0$, podemos concluir que a carga f_{ijr} também será zero. Essa restrição não é obrigatória para a resolução do problema, no entanto, ela auxilia no direcionamento do modelo para a solução.

$$\underbrace{\sum_{p \in P} d_{pj}\varphi_p w_{ijr}}_{\text{Demanda em unidades de peso no nó } j} \leq \underbrace{f_{ijr}}_{\text{Carga carregada em um arco } (i, j)} \quad \forall i, j \in N, r = 1, \dots, R. \quad (3.29)$$

Na restrição 3.30 é definida que a carga é no máximo o valor da capacidade do caminhão e a carga só é definida se o arco (i, j) é percorrido, ou seja, $w_{ijr} = 1$. Além disto, é feita a relação de que se não há um arco (i, j) em uma rota r , $w_{ijr} = 0$ então não é possível levar carga pois $f_{ijr} \leq 0$.

$$\underbrace{f_{ijr}}_{\text{Carga carregada em um arco } (i, j)} \leq \underbrace{\theta_v w_{ijr}}_{\text{Capacidade de carga do veículo } v \text{ ao percorrer um arco } (i, j)} \quad (3.30)$$

$$\forall i, j \in N, v \in V, r = 1, \dots, R.$$

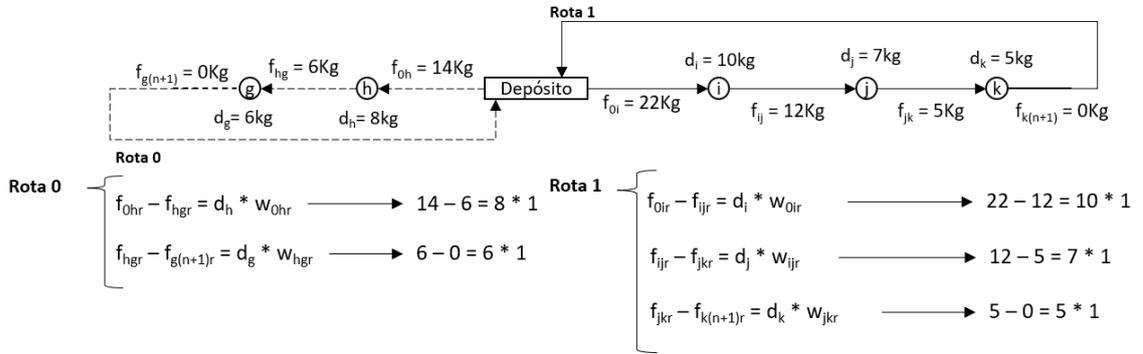
Na restrição 3.31 é definido o balanceamento do fluxo da carga f_{ijr} , considerando o peso real dos produtos, representado pelo parâmetro φ_p . Na figura 11 é exemplificado como a restrição 3.31 funciona. Essa restrição realiza a distribuição da carga ao longo

dos pontos e garante que em cada cliente é deixada a carga necessária para atender a sua demanda $\sum_p d_{pi}$.

$$\underbrace{\sum_{j=0}^{N-1} f_{jir}}_{\text{Carga chegando ao nó } i \text{ na rota } r} - \underbrace{\sum_{j=1}^N f_{ijr}}_{\text{Carga partindo do nó } i \text{ na rota } r} = \underbrace{\sum_p d_{pi} \varphi_p}_{\text{Carga do cliente } i \text{ da rota } r} \underbrace{\sum_{j=0}^{N-1} w_{jir}}_{\text{Carga do cliente } i \text{ da rota } r} \quad (3.31)$$

$\forall i \in N, r = 1, \dots, R.$

Figura 11 – Exemplo da restrição de balanceamento de carga 3.31



Fonte: Autoria própria.

Vejamos um exemplo, supondo que temos 2 rotas: na rota 0 é levada a carga total de 14kg (que é a soma das demanda dos clientes $d_h = 6\text{kg}$ e $d_g = 8\text{kg}$). No primeiro arco, do depósito até o cliente h , é carregado 14kg no veículo. Em seguida ao veículo chegar no cliente h é atendida sua demanda de 8kg, portanto, a carga que sobra no veículo é igual a 6kg, para o próximo atendimento. No arco entre o cliente h e o cliente g é carregada a carga de 6kg, após o atendimento do cliente g o veículo volta ao depósito com a carga vazia $f_{g,(n+1)} = 0$.

A mesma diminuição da carga ao longo da rota ocorre na rota 1 entre os pontos i , j e k , onde o veículo sai com a carga total de 22kg para atender as demandas ($d_i = 10\text{kg}$, $d_j = 7\text{kg}$ e $d_k = 5\text{kg}$), e em cada cliente deixa a carga referente a demanda do cliente. As fórmulas embaixo da figura representam essa distribuição.

O domínio das variáveis é dado pelas restrições de 3.32 até 3.40

$$x_{at}, I_{at}, \pi_{at} \geq 0 \quad a \in C, t \in T. \quad (3.32)$$

$$\mu_{ir} \geq 0 \quad i \in N, r = 1, \dots, R. \quad (3.33)$$

$$Q_{prt} \geq 0 \quad p \in P, r = 1, \dots, R, t \in T. \quad (3.34)$$

$$f_{ijr} \geq 0 \quad i, j \in N, r = 1, \dots, R. \quad (3.35)$$

$$y_{at}, z_{abt} \in \{0, 1\} \quad a \in C, b \in C, t \in T. \quad (3.36)$$

$$\phi_{irt} \in \{0, 1\} \quad i \in N, r = 1, \dots, R, t \in T. \quad (3.37)$$

$$w_{ijr} \in \{0, 1\} \quad i, j \in N, i \neq j, r = 1, \dots, R. \quad (3.38)$$

$$\alpha_{rv} \in \{0, 1\} \quad r = 1, \dots, R, v \in V. \quad (3.39)$$

$$l_{ijr}^{vel} \in \{0, 1\} \quad i, j \in N, r = 1, \dots, R, vel \in VEL. \quad (3.40)$$

Vale ressaltar que as restrições 3.28, 3.29, 3.30 e 3.31 na forma que estão escritas são restrições novas que não foram encontradas em outros trabalhos da literatura, são restrições originais deste modelo e são contribuições do estudo. Isto se da por estarmos tratando de um modelo que é multi rota e multi período, que é baseado em período contínuo no roteamento, e por isto, precisamos adicionar a variável w_{ijr} as restrições, que é o diferencial das restrições.

4 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Neste capítulo são apresentados os experimentos computacionais realizados para validação do modelo CarbonLSMVRP apresentado no capítulo 3. Os experimentos realizados visam atingir os objetivos deste estudo, de estuda o problema integrado do planejamento da produção e do roteamento de veículos na indústria de móveis considerando a redução das emissões da carbono no processo de distribuição, e estão descritos na tabela 9. Na primeira coluna está apresentado o objetivo do experimento, na segunda coluna a identificação do experimento, na terceira coluna está a descrição do experimento, na quarta coluna as instâncias que compõem os experimentos e na quinta coluna quais modelos são utilizados nos experimentos.

Para as comparações dos experimentos 1 e 2 utilizaremos o modelo LSMVRP-F2 (MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019), que descreve um modelo para a indústria de móveis que integra planejamento da produção e roteamento de veículos, e o modelo CarbonLSMVRP, apresentado no capítulo 3 deste estudo. No modelo LSMVRP-F2 a otimização do roteamento é feito para a distância percorrida, enquanto no modelo CarbonLSMVRP a otimização é feita para a redução do gasto de combustível e da emissão de carbono, conforme a função objetivo 3.1.

Os testes computacionais foram feitos utilizando o solver CPLEX Studio 22.1 implementados em C++, através do Visual Basic Studio no Windows 10, em uma CPU com 16Gb de memória RAM e processador Intel I-5.

Tabela 9 – Experimentos realizados com sua descrição e instâncias que são englobadas

Objetivo	Exp.	Descrição do Experimento	Inst.	Modelos
Impacto da Consideração dos Custos de Carga no Roteamento	1	Verificar através da comparação das soluções do modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP qual o impacto da consideração da carga carregada no veículo como variável de decisão considerando os pesos da instância original = 1 kg.	1, 2, 3	LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP
	2	Verificar através da comparação das soluções do modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP qual o impacto da consideração da carga carregada no veículo como variável de decisão considerando pesos reais .	4, 5, 6	LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP
Impacto da Decisão da Velocidade nos Custos de Roteamento	3	Verificar de que maneira a decisão da velocidade impacta nos custos de roteamento e emissão de CO_2 , através de comparação dos modelos com as velocidades constantes em todas rotas: A)80km/h, B)90km/h e C)100km/h.	7A, 7B, 7C, 8A, 8B, 8C, 9A, 9B, 9C	CarbonLSMVRP
	4	Verificar de que maneira a decisão da velocidade impacta nos custos de roteamento e emissão de CO_2 , através de comparação do modelo com velocidade de A)80km/h e com a seleção da velocidade por arco percorrido nas faixas de B)60km/h, 70km/h ou 80km/h.	10A, 10B, 11A, 11B, 12A, 12B	CarbonLSMVRP
Impacto da Adição dos Custos de Carbono no <i>Trade off</i> com a Produção	5	Verificar quais são os impactos no <i>trade off</i> entre os custos de planejamento da produção e os custos de emissão de CO_2 , para isto será comparado um cenário A)sem custos de CO_2 e B)com custos de CO_2 aumentados 10 vezes.	13A, 13B, 14A, 14B	CarbonLSMVRP

Exp. = Experimento; Inst. = Instâncias

A seguir são apresentados os dados utilizados nas instâncias. Os tamanhos dos conjuntos de cada instância estão apresentados no Anexo F.

4.1 Dados utilizados

Os dados utilizados na geração das instâncias se classificam em dois tipos: os dados fixos, que são os dados comuns em todas instâncias, como por exemplo: a área frontal do veículo, densidade do ar, inventário mínimo, preço do combustível, e outros parâmetros constantes relacionados aos veículos. E os dados particulares a cada instância, que variam entre as instâncias e visam representar determinado cenário como a velocidade e os pesos dos produtos, que serão descritos dentro de cada experimento.

Os dados fixos estão apresentados na tabela 10.

Tabela 10 – Dados fixos de todas instâncias ilustrativas

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade	Fonte	Tipo
h_a	Custo de inventário do item a	0,06	u.m.*	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	P
I_a^{min}	Inventário mínimo do item a	0	Componentes	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	P
ρ_a	Tempo consumido para produção de uma unidade do componente a	1	Segundos	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	P
$[\delta_{it}, \bar{\delta}_{it}]$	Janela de tempo do cliente i no período t	8h até 18h	Segundos	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	R
λ	Tempo de carga/descarga por unidade de peso	0.02	Segundos	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	R
Δ_i	Prazo de entrega pré estabelecido	3960	Segundos	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	R
p_f	Preço do combustível por litro	1,2	u.m.	(QIU et al., 2020)	RCO_2
\bar{e}	Fator de emissão de carbono	2,32	-	(QIU et al., 2020)	RCO_2
\bar{k}	Fator de fricção do motor do veículo	0,2	kJ/rev/l	(QIU et al., 2020)	RCO_2
\bar{N}	Velocidade do motor do veículo	33	rev/s	(QIU et al., 2020)	RCO_2
\bar{V}	Deslocamento do motor do veículo	5	l	(QIU et al., 2020)	RCO_2
\bar{w}	Peso do veículo	6350	kg	(QIU et al., 2020)	RCO_2
ξ	Relação de massa de combustível-ar	1	-	(QIU et al., 2020)	RCO_2
κ	Valor de aquecimento de um combustível diesel típico	44	kJ/g	(QIU et al., 2020)	RCO_2
ψ	Fator de conversão de gramas para litros	737	g/l	(QIU et al., 2020)	RCO_2
ε	Eficiência do trem de força do veículo	0,4	-	(QIU et al., 2020)	RCO_2
ϖ	Parâmetro de eficiência para motores a diesel de um veículo	0,9	-	(QIU et al., 2020)	RCO_2
\bar{r}	Aceleração do veículo	0	m/s^2	(QIU et al., 2020)	RCO_2
\bar{g}	Gravidade	9, 8	m/s^2	(QIU et al., 2020)	RCO_2
$\bar{\theta}$	Ângulo da estrada	0	-	(QIU et al., 2020)	RCO_2
C_r	Coefficiente de resistência ao rolamento do veículo	0.01	-	(QIU et al., 2020)	RCO_2
C_d	Coefficiente de arrasto aerodinâmico do veículo	0.7	-	(QIU et al., 2020)	RCO_2
\bar{A}	Área frontal do veículo	3,912	m^2	(QIU et al., 2020)	RCO_2
ρ_{ar}	Densidade do ar	1,2041	kgm/m^3	(QIU et al., 2020)	RCO_2

*u.m.= unidade monetária

Na primeira coluna (Parâmetro) é indicado o parâmetro conforme notação do modelo matemático apresentado no capítulo anterior, na segunda coluna (Descrição) é

descrito o parâmetro, na terceira coluna (Valor) é definido o valor utilizado, na quarta coluna (Unidade) é descrita a unidade de medida, na quinta coluna (Fonte) temos o a fonte da onde foi extraído o valor utilizado e na sexta coluna (Tipo) os parâmetros divididos em 3 grupos: os parâmetros de produção (P), de roteamento de veículos (R) e de roteamento de veículos relacionado a emissão de carbono (RCO_2).

4.2 Consideração dos Custos de Carga no Roteamento dos Veículos: Experimentos 1 e 2

Esta seção tem o objetivo de analisar qual o impacto dos custos da carga carregada nos veículos (f_{ijr}) nas decisões de roteamento dos veículos. A cada entrega de produtos a carga do caminhão diminui, então a cada arco (i, j) a carga (f_{ijr}) ira diminuir, tendo em vista que ela é penalizada na função objetivo, essa decisão pode alterar as decisões na sequência de clientes visitados. Para isto vamos utilizar os Experimentos 1 e 2, onde as soluções dos modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP são comparados .

- Experimento 1: utiliza as instâncias originais de (MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019) com peso de 1kg para cada produto.
- Experimento 2: utiliza pesos reais de cada produto.

Para a análise das diferenças de custos entre os modelos serão comparados os termos que fazem parte da função objetivo, apresentados na tabela 11. A primeira coluna da tabela apresenta o tipo de custo na função objetivo, a segunda coluna (Termo) apresenta a representação algébrica. Nas linhas Combustível e Carbono estão apresentadas as respectivas taxas p_f e $\bar{e}p_c$ que multiplicam os termos. Ao fim da tabela será também informado a distância percorrida na rota definida e a emissão de carbono em Kg .

O modelo LSMVRP-F2 não possui custos de combustível e carbono. Portanto, esses custos foram calculados a posteriori fixando a solução obtida do modelo F2 no modelo CarbonLSMVRP. Nas tabelas 13, 14 e 15 haverão duas colunas que indicarão os valores de cada custo para cada modelo.

Tabela 11 – Apresentação dos custos analisados nos experimentos computacionais

Função Objetivo	Termo
Combustível + Carbono	
Combustível	p_f^*
Motor do Veículo	$\sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{k} \bar{N} \bar{V} \bar{d}_{ij} \sum_{vel} l_{ijr}^{vel} / \bar{v}^{vel}$
Peso do Veículo	$\sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{w} \bar{\alpha}_{ij} \bar{d}_{ij} \bar{\gamma} w_{ijr}$
Carga	$\sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{\alpha}_{ij} \bar{d}_{ij} \bar{\gamma} f_{ijr}$
Resistência ao Ar	$\sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{\beta} \bar{d}_{ij} \bar{\gamma} \sum_{vel} l_{ijr}^{vel} (\bar{v}^{vel})^2$
Carbono	
Motor do Veículo	$\sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{k} \bar{N} \bar{V} \bar{d}_{ij} \sum_{vel} l_{ijr}^{vel} / \bar{v}^{vel}$
Peso do Veículo	$\sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{w} \bar{\alpha}_{ij} \bar{d}_{ij} \bar{\gamma} w_{ijr}$
Carga	$\sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{\alpha}_{ij} \bar{d}_{ij} \bar{\gamma} f_{ijr}$
Resistência ao Ar	$\sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{\beta} \bar{d}_{ij} \bar{\gamma} \sum_{vel} l_{ijr}^{vel} (\bar{v}^{vel})^2$
Distância	$\sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} c_{ij} w_{ijr}$
Kg de Carbono	Custo do Carbono Emitido / Preço do Carbono por Kg

4.2.1 Experimento 1

Os dados particulares da instância 1 estão apresentados na tabela 12, ela é então composta pelos dados das tabelas 10 e 12. É importante ressaltar que o peso utilizado para cada produto é de 1 unidade de peso, conforme as instâncias originais. Neste caso o peso da carga carregada é igual ao número total de demanda de produtos, uma vez que o peso de cada produto é igual a 1kg.

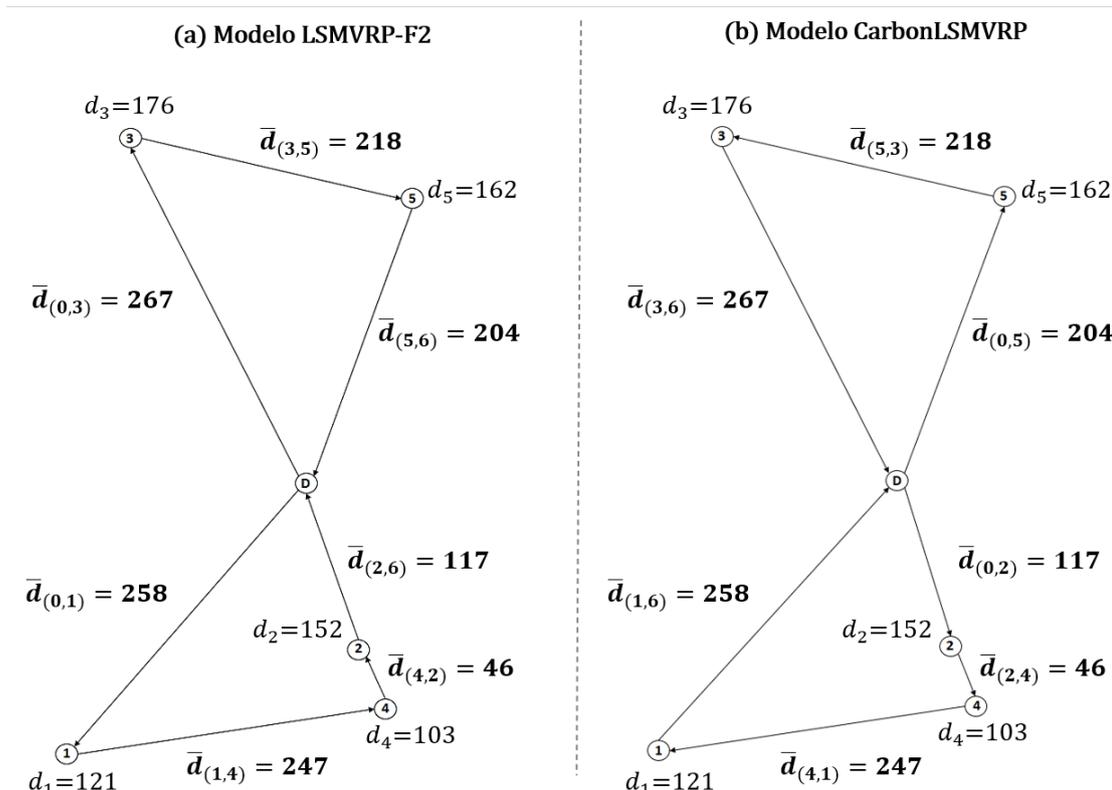
Tabela 12 – Dados particulares à instância 1

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade	Fonte	Tipo1
\hat{c}_{ab}	Custo de <i>setup</i> do item <i>a</i> para o <i>b</i>	25	u.m.	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	P
η_{ap}	Quantidade de unidades do item <i>a</i> para produzir uma unidade do produto <i>p</i>	Anexo F	-	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	P
ζ_{ab}	Unidade de tempo para troca de produção do item <i>a</i> para <i>b</i>	Anexo F	Segundos	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	P
K_t	Capacidade de produção no período <i>t</i>	2827	Componentes	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	P
θ_v	Capacidade do veículo <i>v</i>	500	kg	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	R
φ_p	Peso do produto <i>p</i>	1	Kg	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	R
d_{pi}	Demanda do produto <i>p</i> no cliente <i>i</i>	Anexo F	Produtos	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	R
p_c	Preço do carbono por kg	0,027	u.m.	(QIU et al., 2020)	RCO ₂
\bar{d}_{ij}	Distância do nó <i>i</i> ao nó <i>j</i>	Anexo F	m	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	RCO ₂
\bar{v}^{vel}	Velocidade do veículo sob a velocidade <i>vel</i>	22,22	m/s	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	RCO ₂

Essa instância foi utilizada nos dois modelos, e na figura 12 estão apresentadas as rotas obtidas com base na solução desses modelos. A figura 12 foi feita considerando as proporções reais das distâncias entre os clientes. Os pontos enumerados de (1) até (5) são os clientes, (D) é o depósito, e as seqüências das rotas estão representadas pelas setas. Na figura estão apresentadas as distâncias entre os clientes e a demanda de cada um.

Os resultados dos custos de *setup*, inventário e roteamento, representado pelo

Figura 12 – Instância 1: Rotas do modelo (a)LSMVRP-F2 e (b)CarbonLSMVRP



Fonte: Autoria própria.

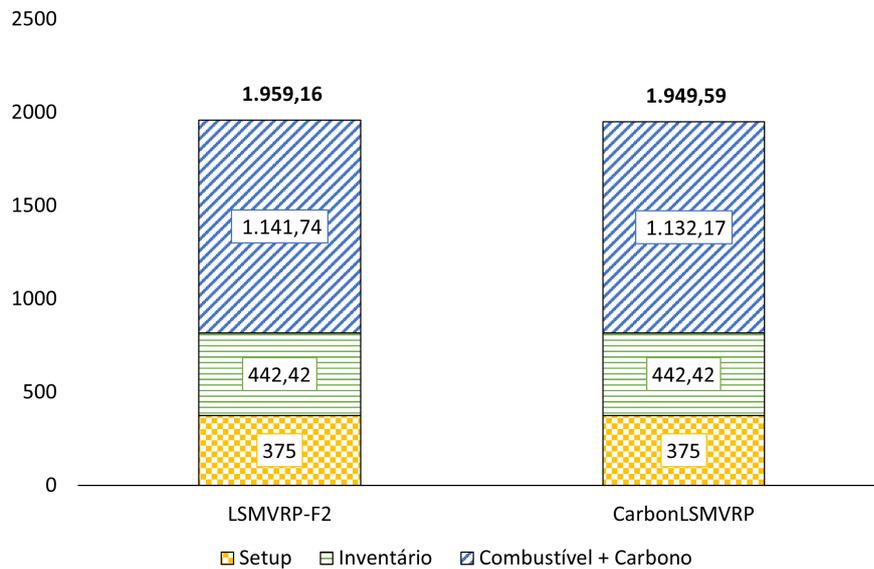
Combustível + Carbono estão apresentados na figura 13. Logo abaixo do custo total estão apresentados os termos dos custos da função objetivo que compõe o custo de combustível e em seguida os custos de carbono. Conforme mencionado anteriormente, para obter os valores de Combustível + Carbono no modelo LSMVRP-F2 foi necessário fixar a solução no modelo CarbonLSMVRP.

Para complementar a análise, na tabela 13 estão apresentados os custos que compõem o custo de Combustível + Carbono apresentados na figura 13. Na primeira coluna está apresentado o objeto de minimização na função objetivo. Na segunda e terceira coluna estão apresentados os valores para cada modelo.

Os valores do custo de carga para o modelo LSMVRP-F2 totalizam 29,50 (28,04 do combustível e 1,46 do carbono), enquanto para o modelo CarbonLSMVRP o total é de 19,39 (18,94 do combustível e 0,99 do carbono), uma redução de 32% apenas para o custo de Carga.

Observando os custos de roteamento da tabela 13, vemos que por mais que duas rotas possuam a mesma distância de 1357km, a diferença no sequenciamento impacta na distribuição de carga e isto acarreta uma diminuição nos custos de gasto de combustível e nos custos de emissão de carbono. A diferença no sequenciamento reflete em um custo 0,84% maior de Combustível + Carbono para o modelo LSMVRP-F2 de 1.141,74 enquanto

Figura 13 – Custos de *setup*, inventário e combustível + carbono para os modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP da instância 1



Fonte: Autoria própria.

Tabela 13 – Custos de roteamento de veículos dos modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP: Instância 1

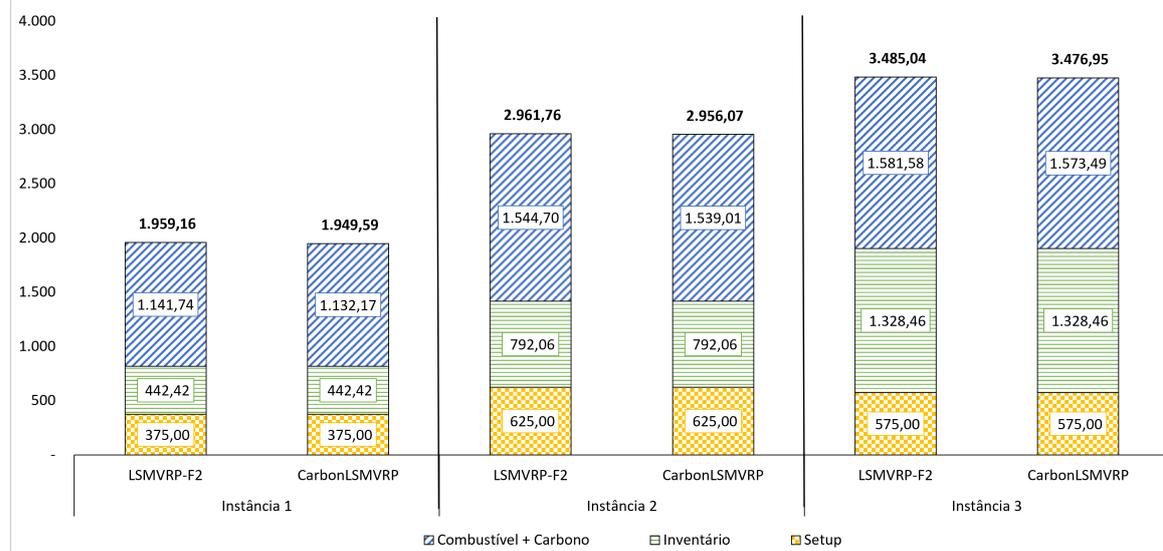
Custos	LSMVRP-F2	CarbonLSMVRP
Combustível + Carbono	1.141,74	1.132,17
Combustível	1.085,10	1.076,00
Motor do Veículo	74,57	74,57
Peso do Veículo	868,92	868,92
Carga	28,04	18,94
Resistência ao Ar	113,56	113,56
Carbono	56,64	56,17
Motor do Veículo	3,89	3,89
Peso do Veículo	45,36	45,36
Carga	1,46	0,99
Resistência ao Ar	5,93	5,93
Distância	1.357	1.357
Kg de Carbono	107,73	106,83

o modelo CarbonLSMVRP ficou com 1.132,17. Vemos também que não há diferença entre o custo total de produção (*setup* de 375 e inventário de 442,42).

Isto indica que considerar o descarregamento das cargas ao longo das rotas, ou seja, a diminuição do peso da carga no roteamento é essencial para redução no gasto de combustível e emissão de carbono.

Foram construídas outras duas instâncias (2 e 3) maiores que a instância 1 para verificar se a redução ocorre em outros cenários, sendo seus dados apresentados no Anexo F, de maneira sucinta possuem mais clientes, números de produtos e componentes, rotas e períodos. Na figura 14 estão apresentados os custos de produção e roteamento para as três instâncias deste experimento.

Figura 14 – Custos de *setup*, inventário e combustível + carbono para três as instâncias do experimento 1, modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP



Fonte: Autoria própria.

Observamos na figura 14 que nas três instâncias para os dois modelos os custos de *setup* e inventário se mantêm e os custos de roteamento variam, sendo menores no modelo CarbonLSMVRP.

Vemos pelas tabelas 14 e 15, onde estão detalhados os custos de combustível + carbono para as instâncias 2 e 3 respectivamente, que em relação as rotas obtidas nas soluções das instâncias 2 e 3 obteve-se o mesmo comportamento que na instância 1. A distância percorrida é a mesma, e os clientes nas rotas são os mesmos, porém, em um sequenciamento diferente devido a consideração do peso da carga do veículo ao longo dos nós.

A instância 2 possui um custo de roteamento de 1.544,70 u.m. com o modelo LSMVRP-F2, enquanto, com o modelo CarbonLSMVRP o custo é de 1.539,01, uma redução no custo de roteamento de 0,37%. Na instância 3 o custo do modelo LSMVRP-F2 é de 1.581,58 enquanto o CarbonLSMVRP é de 1.573,49, isto é, 0,51% menor.

Podemos concluir então que ao se comprar modelo com e sem inclusão dos custos de carga do veículo variando ao longo da rota, os valores de *setup*, inventário, da distância percorrida e os clientes em cada rota permanecem os mesmos nos dois modelos. Porém, há um ganho na redução de custo de combustível e carbono devido a diferença nos sequenciamento das rotas e seu impacto na redução das cargas do veículo durante as rotas.

O tempo computacional para encontrar as soluções do experimento 1 estão na tabela 16.

Tabela 14 – Custos de roteamento de veículos dos modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP: Instância 2

Custos	LSMVRP-F2	CarbonLSMVRP
Combustível + Carbono	1.544,70	1.539,01
Combustível	1.223,39	1.218,89
Motor do Veículo	84,52	84,52
Peso do Veículo	984,82	984,82
Carga	25,34	20,83
Resistência ao Ar	128,71	128,71
Carbono	321,31	320,13
Motor do Veículo	22,20	22,20
Peso do Veículo	258,65	258,65
Carga	6,65	5,47
Resistência ao Ar	33,80	33,80
Distância	1.538	1.538
Kg de Carbono	611,14	608,89

Tabela 15 – Custos de roteamento de veículos dos modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP: Instância 3

Custos	LSMVRP-F2	CarbonLSMVRP
Combustível + Carbono	1.580,47	1.573,49
Combustível	1.251,72	1.246,19
Motor do Veículo	84,79	84,80
Peso do Veículo	988,02	988,02
Carga	49,78	44,24
Resistência ao Ar	129,13	129,13
Carbono	328,8	327,3
Motor do Veículo	22,27	22,27
Peso do Veículo	259,49	259,49
Carga	13,07	11,62
Resistência ao Ar	33,91	33,91
Distância	1.543	1.543
Kg de Carbono	625,38	622,53

Tabela 16 – Tempo computacional para encontrar soluções do experimento 1

Instância	Modelo	Tempo Computacional (Segundos)
1	LSMVRP- F2	0,47
1	CarbonLSMVRP	1,23
2	LSMVRP- F2	2,97
2	CarbonLSMVRP	8,72
3	LSMVRP- F2	1.208,75
3	CarbonLSMVRP	108,13

4.2.2 Experimento 2

O experimento 2 tem como objetivo comparar os modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP, considerando os pesos reais dos produtos demandados, representados pelo parâmetro φ_p . Os dados particulares da instância 4 estão apresentados na tabela 17.

Tabela 17 – Dados particulares à instância 4

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade	Fonte	Tipo1
\hat{c}_{ab}	Custo de <i>setup</i> do item <i>a</i> para o <i>b</i>	25	u.m.	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	P
η_{ap}	Quantidade de unidades do item <i>a</i> para produzir uma unidade do produto <i>p</i>	Anexo F	-	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	P
ζ_{ab}	Unidade de tempo para troca de produção do item <i>a</i> para <i>b</i>	Anexo F	Segundos	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	P
K_t	Capacidade de produção no período <i>t</i>	2827	Componentes	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	P
θ_v	Capacidade do veículo <i>v</i>	6350	kg	(QIU et al., 2020)	R
φ_p	Peso do produto <i>p</i>	15,20 e 30	kg	Gerado	R
d_{pi}	Demanda do produto <i>p</i> no cliente <i>i</i>	Anexo F	Produtos	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	R
p_c	Preço do carbono por kg	0,027	u.m	(QIU et al., 2020)	RCO_2
\bar{d}_{ij}	Distância do nó <i>i</i> ao nó <i>j</i>	Anexo F	m	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	RCO_2
\bar{v}^{vel}	Velocidade do veículo sob a velocidade <i>vel</i>	22,22	m/s	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	RCO_2

No estudo de (MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019) o peso dos itens foram considerados todos iguais a 1kg, já para a presente instância foram obtidos valores reais através das fichas técnicas dos móveis disponíveis em sites de lojas de venda da empresa utilizada no estudo de caso. Os pesos de cada produto estão apresentados na figura 15.

Figura 15 – Exemplos de pesos reais de móveis



Fonte: Autoria própria.

Após resolver as instâncias foram obtidas as rotas apresentada na figura 16. Os pontos (1) até (5) são os clientes e (D) é o depósito. Nesta figura foram adicionados os pesos da carga carregada para cada cliente. As rotas estão apontadas por setas, que indicam o sequenciamento da rota.

Na figura 17 estão apresentados os custos de *setup*, inventário e roteamento para a instância 4, para ambos modelos.

Os custos de Combustível + Carbono estão apresentadas na tabela 18, com a comparação dos custos por modelo.

Figura 16 – Instância 4: Rotas do modelo (a)LSMVVRP-F2 e (b)CarbonLSMVVRP

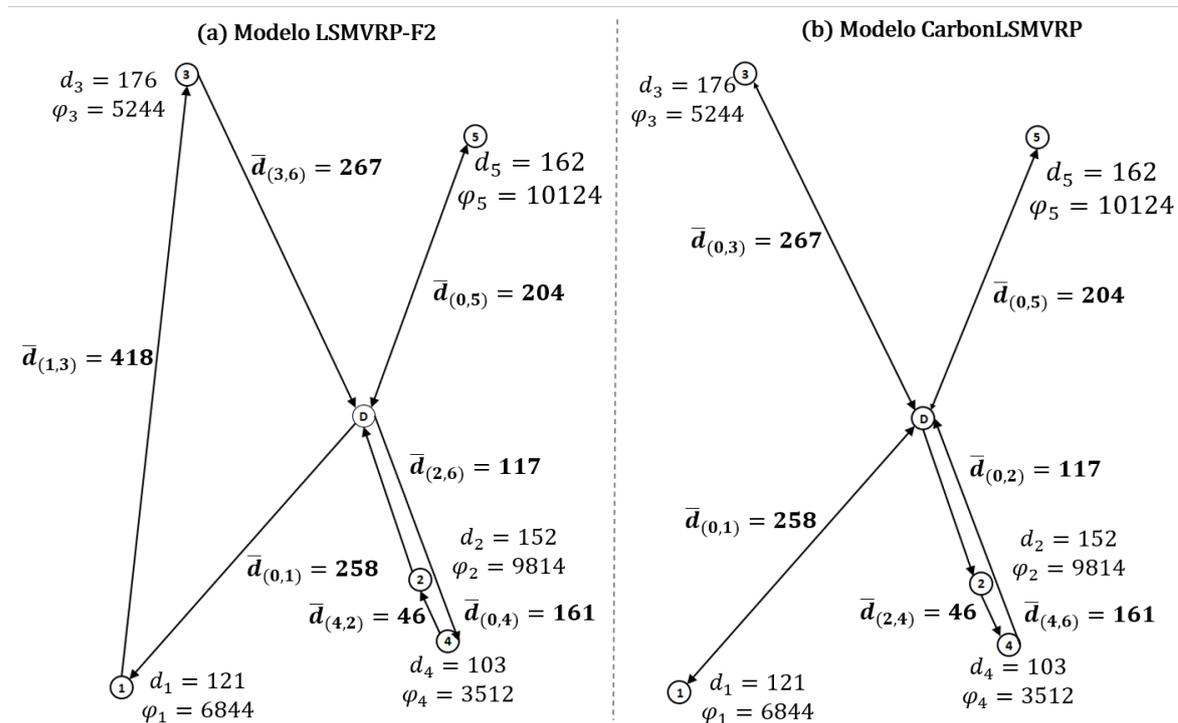
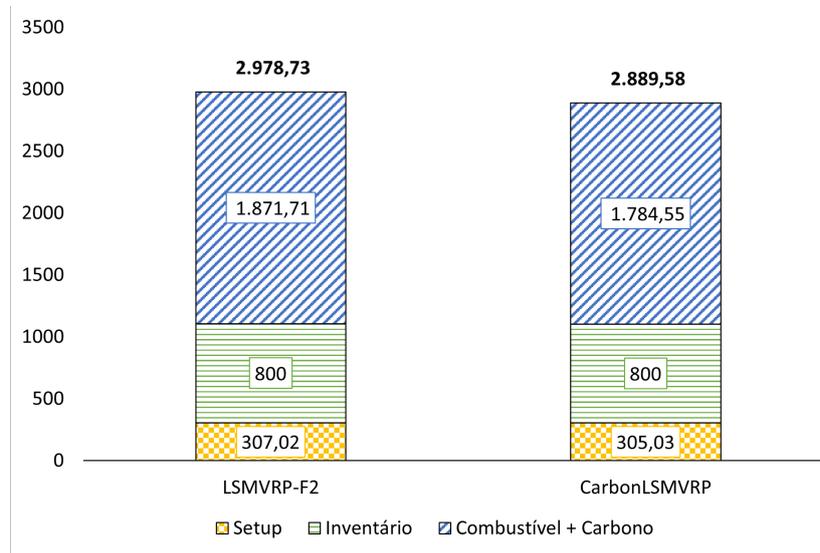


Figura 17 – Custos de *setup*, inventário e combustível + carbono para os modelos LSMVVRP-F2 e CarbonLSMVVRP da instância 4



Analisando as rotas definidas na figura 16, observa-se que há diferença nas rotas definidas por cada modelo. No modelo LSMVVRP-F2 em que não há consideração de carga são necessárias 3 rotas que totalizam 1675km, já o modelo CarbonLSMVVRP há 4 rotas definidas que totalizam 1784,45km. Analisando os custos da tabela 18 observa-se que no modelo LSMVVRP-F2 a solução possui uma distância de 107km menor que o modelo CarbonLSMVVRP. No entanto, quando observamos a figura 17, por mais que a distância

Tabela 18 – Custos de roteamento de veículos dos modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP com base na instância 4

Custos	LSMVRP-F2	CarbonLSMVRP
Combustível + Carbono	1.871,71	1.784,45
Combustível	1.778,85	1.695,92
Motor do Veículo	92,05	97,93
Peso do Veículo	1.072,55	1.141,06
Carga	474,09	307,80
Resistência ao Ar	140,18	149,13
Carbono	92,86	88,53
Motor do Veículo	4,80	5,11
Peso do Veículo	55,99	59,56
Carga	24,75	16,073
Resistência ao Ar	7,32	7,78
Distância	1.675	1.782
Kg de Carbono	176,62	168,39

seja menor os valores de custo de Combustível + Carbono para o modelo LSMVRP resulta em 1.871,71, um valor 4,66% maior que o valor do modelo CarbonLSMVRP que possui o valor de 1.784,45. O que indica que por mais que uma rota possa ser menor, não necessariamente ela tem um menor gasto de combustível.

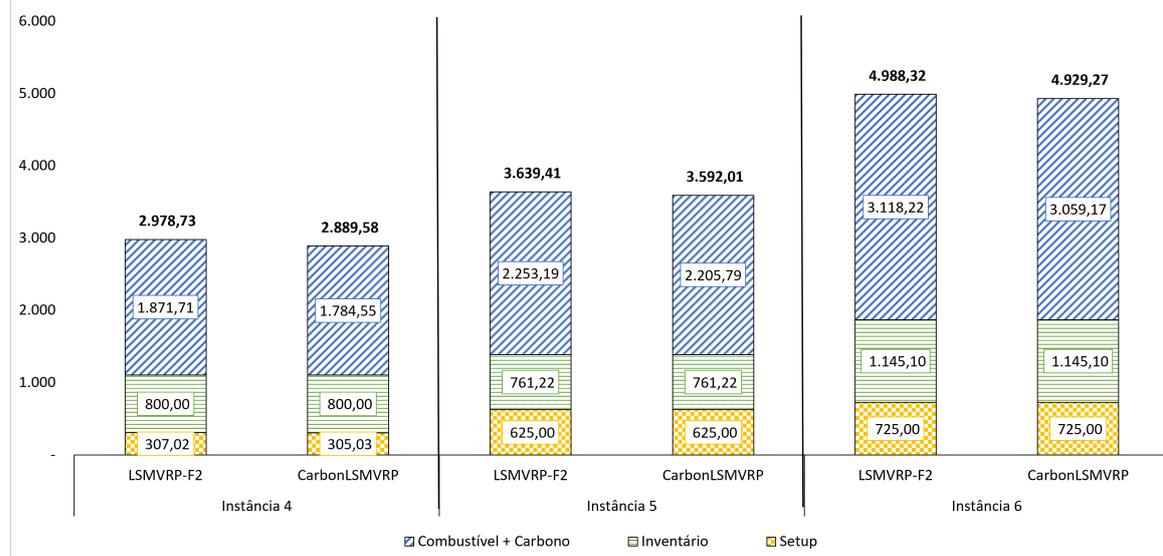
Observa-se também pela tabela 18, que a minimização ocorre tanto no combustível quanto no carbono, uma vez que são custos relacionados. Nos termos que compõem os Custos de Combustível + Carbono, o modelo CarbonLSMVRP possui o total de 4,66% menor pelo custo da Carga, porém os outros custos (Motor do Veículo, Peso do Veículo, Resistência do ar) são maiores no modelo CarbonLSMVRP por percorrer uma distância maior.

Ao se considerar pesos realistas e os impactos de cada custo na função objetivo fica evidente a importância de se considerar a carga para a indústria de móveis, devido ao impacto da carga na decisão de rota. Enquanto na Instância 1 tivemos um ganho de 0,84% no custo total de roteamento, na Instância 4 tivemos um ganho de 4,66%.

Para validar os pontos acima, foram construídas mais duas instâncias (5 e 6) com tamanhos dos conjuntos de clientes, rotas, períodos, produtos e componentes maiores, os valores podem ser encontrados no Anexo F. Seus resultados de custo estão apresentadas na figura 18, e nas tabelas 19 e tabela 20 estão detalhados os custos de Combustível + Carbono para as instâncias 5 e 6 respectivamente. Os dados dessas instâncias estão no Anexo F.

Para as instâncias 5 e 6, o comportamento foi o mesmo da instância 4, onde há a redução do custo total para combustível e carbono. Na instância 5 o valor total de Combustível + Carbono para o modelo LSMVRP-F2 foi de 2.253,19 e para o modelo CarbonLSMVRP foi de 2.205,79, com um ganho médio em custo de roteamento de 2,10%. Já para a instância 6 o valor no modelo sem considerar o carbono foi de 2.698,92, enquanto

Figura 18 – Custos de *setup*, inventário e combustível + carbono para as instâncias do experimento 2 com os modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP



Fonte: Autoria própria.

no modelo que considera o carbono foi de 2.513,70, representando um ganho de custo de 6,86%. O valor médio de redução de custo das três instâncias de 4,73%.

Adicionalmente ao experimento 1, pela comparação das instâncias 4, 5 e 6 podemos observar que:

- Considerar custos de carga na redução de gasto de combustível e emissão de carbono pode alterar a seleção da ordem de atendimento aos clientes por rota comparado a quando se considera apenas a distância.
- Considerar pesos realistas tem um impacto maior na redução do consumo de combustível e emissão de carbono, do que considerando o mesmo peso por item .

Tabela 19 – Custos de roteamento de veículos dos modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP com base na instância 5

Custos	LSMVRP-F2	CarbonLSMVRP
Combustível + Carbono	2.253,19	2.205,79
Combustível	1.784,51	1.746,96
Motor do Veículo	98,42	98,42
Peso do Veículo	1.146,82	1.146,82
Carga	389,38	351,83
Resistência ao Ar	149,89	149,89
Carbono	468,68	458,82
Motor do Veículo	25,85	25,85
Peso do Veículo	301,20	301,20
Carga	102,27	92,41
Resistência ao Ar	39,37	39,37
Distância	1.791	1.791
Kg de Carbono	891,44	872,69

Tabela 20 – Custos de roteamento de veículos dos modelos LSMVRP-F2 e CarbonLSMVRP com base na instância 6

Custos	LSMVRP-F2	CarbonLSMVRP
Combustível + Carbono	3.118,22	3.059,17
Combustível	2.469,60	2.442,84
Motor do Veículo	130,62	130,62
Peso do Veículo	1.522,06	1.522,06
Carga	618,00	571,23
Resistência ao Ar	198,93	198,93
Carbono	648,62	636,33
Motor do Veículo	34,31	34,31
Peso do Veículo	399,75	399,75
Carga	162,31	150,03
Resistência ao Ar	52,25	52,25
Distância	2.377	2.377
Kg de Carbono	1.233,69	1.210,31

O tempo computacional para encontrar as soluções do experimento 2 estão na tabela 21.

Tabela 21 – Tempo computacional para encontrar soluções do experimento 2

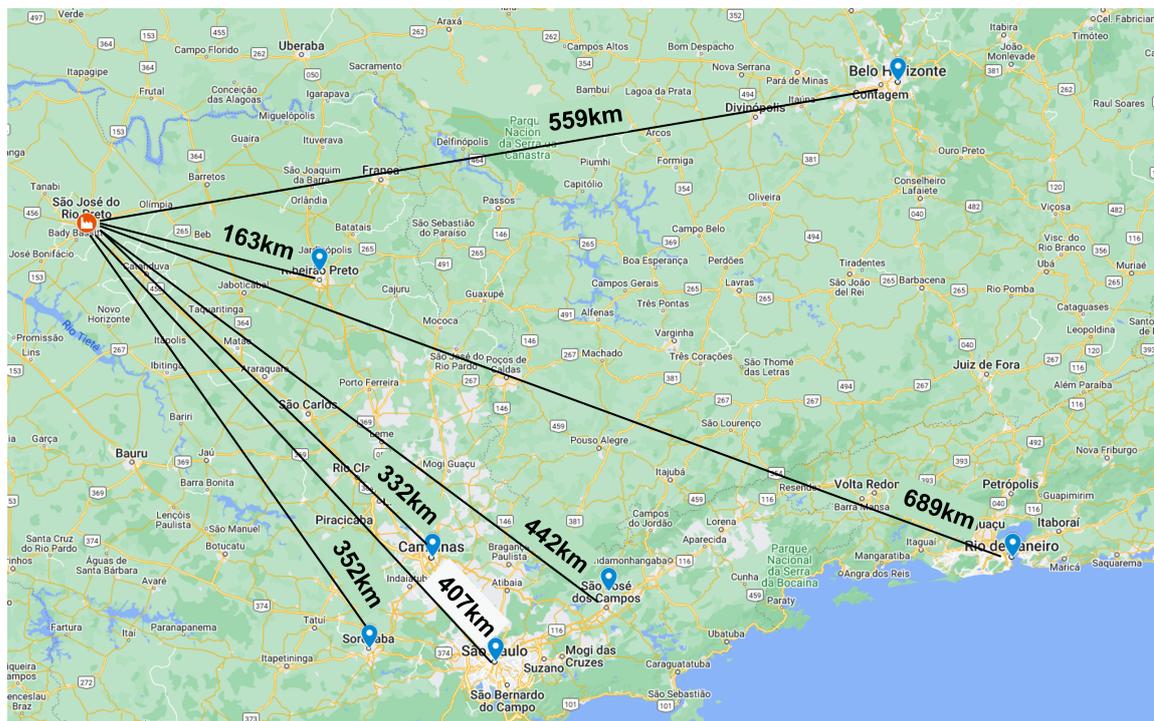
Instância	Modelo	Tempo Computacional (Segundos)
4	LSMVRP- F2	18,47
4	CarbonLSMVRP	134,84
5	LSMVRP- F2	66,16
5	CarbonLSMVRP	17,59
6	LSMVRP- F2	45.084,87
6	CarbonLSMVRP	39.919,22

4.3 Escolha da Velocidade dos Veículos nas Rotas: Experimentos 3 e 4

Esta seção considera a possibilidade de seleção da velocidade que o veículo irá adotar para percorrer as rotas no modelo CarbonLSMVRP. O objetivo é verificar se há diferença no consumo de combustível e emissão de CO_2 , e também avaliar o quanto a velocidade pode influenciar no atendimento das demandas, dado que há janelas de tempo que devem ser respeitadas. Nestes experimentos será considerada uma frota homogênea.

Para os experimentos 3 e 4 iremos apresentar um cenário baseado em cidades reais, com distâncias medidas. Na figura 19 estão apresentadas as cidades: São José do Rio Preto, Sorocaba, Campinas, São Paulo, Rio de Janeiro, Belo horizonte, Ribeirão Preto e São José dos Campos. Essas cidades foram escolhidas devido ao seu porte e proximidade a fábrica utilizada como referência para este estudo. O depósito na figura é representado por São José do Rio Preto, e as outras cidades são os clientes. A localização geográfica (latitude e longitude) das cidades da figura 19 estão apresentadas na tabela 22

Figura 19 – Mapa com distâncias entre depósito e clientes para os experimentos 3 e 4.



Fonte: Autoria própria.

É importante ressaltar que a velocidade aparece em dois termos da função objetivo: no terceiro termo, apresentado na função 3.1 onde o consumo de combustível é dado pelas características de resistência do motor do veículo e a velocidade é inversamente proporcional ao consumo (maior velocidade, menor consumo), e no sexto termo da função 3.1, onde a resistência ao ar é refletida no consumo de combustível e a velocidade é diretamente proporcional a este consumo (maior velocidade maior consumo).

Tabela 22 – Localização geográfica das cidades dos experimentos 3 e 4.

Cidade	Latitude	Longitude
São José do Rio Preto	20° 49' 13" Sul	49° 22' 47" Oeste
São Paulo	23° 32' 56" Sul	46° 38' 20" Oeste
Campinas	22° 54' 23" Sul	47° 3' 42" Oeste
Sorocaba	23° 30' 22" Sul	47° 27' 21" Oeste
Rio de Janeiro	22° 54' 13" Sul	43° 12' 35" Oeste
Belo Horizonte	19° 48' 57" Sul	43° 57' 15" Oeste
Ribeirão Preto	21° 10' 36" Sul	47° 49' 15" Oeste
São José dos Campos	23° 10' 45" Sul	45° 53' 14" Oeste

Os experimentos 3 e 4 têm o objetivo de:

- Experimento 3: nele a velocidade é escolhida e mantida durante todas as rotas da instância, espera-se verificar como diferentes velocidades impactam nos custos de roteamento.
- Experimento 4: nele cada arco (i, j) pode ser percorrido com uma velocidade diferente, espera-se verificar como a seleção da velocidade por uma variável l_{ijr}^{vel} impacta na redução de custos quando consideramos os cenários: (a) Velocidade fixa (a mínima necessária para atender as janelas de tempo) e (b) Com a decisão de velocidade.

4.3.1 Experimento 3

Para o experimento 3 iremos apresentar o conjunto de instâncias 7A, 7B e 7C em detalhe. Os dados particulares para estas instâncias estão apresentados na tabela 23. Para o conjunto de instâncias 7 as cidades selecionadas como clientes foram: São Paulo, Campinas, Sorocaba, Rio de Janeiro e Belo Horizonte.

Para estas instâncias a maior distância entre o depósito e o cliente é o Rio de Janeiro com distância de 689km, portanto, para o veículo conseguir atender essa distância dentro da janela de tempo e do prazo de entrega máximo a velocidade mínima é 80km/h. Como é necessário atender a janela de tempo, a menor velocidade fixa possível para este caso é 80km/h. Com base nisto, neste experimento foram comparadas 3 instâncias: A) 80km/h (22,22m/s), B) 90km/h (25m/s) e C) 100km/h (27,78m/s).

As soluções dos três cenários de velocidades apresentam o mesmo roteamento, apresentado na figura 20. Nesta figura as rotas estão apresentadas por setas, sendo cada cor uma rota diferente.

Para as três velocidades do experimento 3 foram levantados os custos de produção, combustível e carbono, apresentado na figura 21. Observando a figura, vemos que o valor de combustível + carbono cresce conforme as velocidades, este comportamento será analisado a seguir com base no detalhamento na composição desses custos.

Figura 21 – Custos de *setup*, inventário e combustível + carbono para instâncias 7A, 7B e 7C.

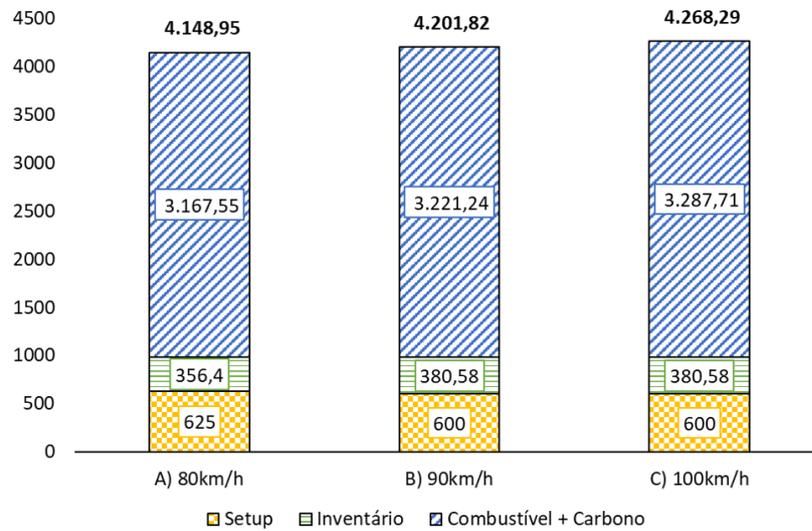


Tabela 24 – Custos de roteamento de veículos do modelo CarbonLSMVRP para instâncias 7A, 7B e 7C

Custos	A) 80km/h	B) 90km/h	C) 100km/h
Combustível + Carbono	3.167,55	3.221,24	3.287,71
Combustível	3.010,41	3.061,43	3.124,60
Motor do Veículo	173,91	154,59	139,13
Peso do Veículo	2.026,50	2.026,50	2.026,50
Carga	545,13	545,13	545,13
Resistência ao Ar	264,89	335,21	413,84
Carbono	157,14	159,81	163,10
Motor do Veículo	9,08	8,07	7,26
Peso do Veículo	105,78	105,78	105,78
Carga	28,46	28,46	28,46
Resistência ao Ar	13,83	17,50	21,60
Distância	3.617	3.617	3.617
Kg de Carbono	298,89	303,96	310,22

é a resistência e, portanto, menor é o consumo. Verificamos isto na tabela, ao observar que os custos são maiores na instância 7A de 80km/h: 182,99 (173,91 do combustível + 9,08 do carbono) e menores na instância 7C de 100km/h: 146,39 (139,13 do combustível + 7,26 do carbono).

- Resistência ao ar: neste cenário quanto maior a velocidade, maior é a resistência ao ar e maior é o consumo de combustível. Vemos que conforme a velocidade aumenta este custo também aumenta, na instância 7A de 80km/h temos custo de 278,72 (264,89 do combustível e 13,83 do carbono) e na instância 7C 100km/h temos 435,22 (413,84 do combustível e 21,6 do carbono)

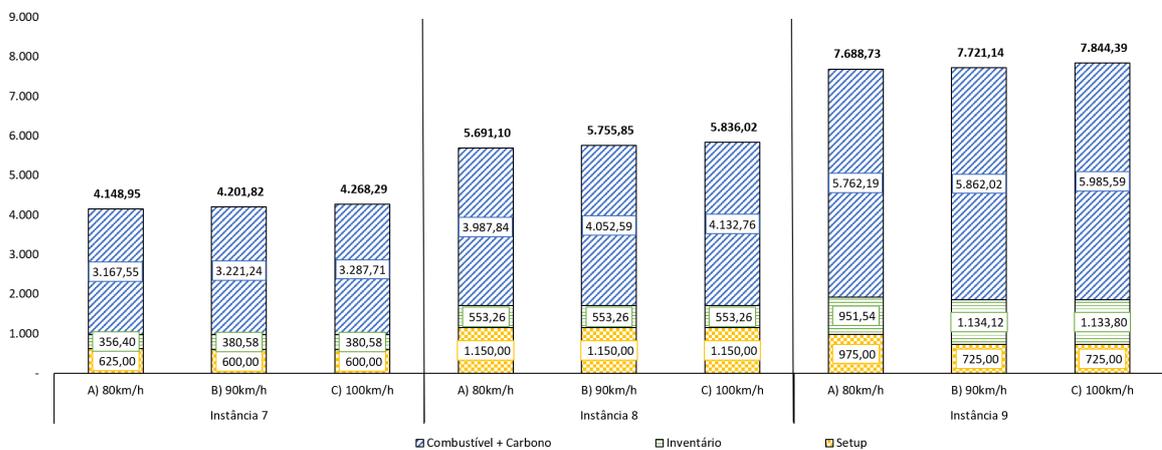
Ao analisarmos estes dois custos na tabela 24, vemos que a Resistência ao Ar representa proporcionalmente um custo maior ao Motor da velocidade. Portanto, ao se

aumentar a velocidade a partir de 80km/h ocorrerá um gasto maior de combustível. A possibilidade de velocidades menores será abordada no experimento 4, uma vez que neste experimento é necessário que as janelas de tempo sejam atendidas.

É importante também mencionar que ao analisar a figura 21, vemos que os custos de troca são de 625 na instância 7A e nas instâncias 7B e 7C são de 600, isso se dá devido a diferença no sequenciamento das rotas. Como as velocidades 90k/m e 100km/h são maiores, conseguem atingir a otimização das sequências de cliente de melhor forma, já a velocidade de 80km/h precisa realizar um sequenciamento que é limitado pelas velocidades. No entanto, há uma compensação no inventário, que é de 356,4 na velocidade de 80km/h e 380,58 nas velocidades de 90km/h e 100km/h. Quando comparamos os custos de Produção + Inventário, para 80km/h temos 981,4 e para as outras velocidades temos 980,58.

Para este experimento também foram rodados dois conjuntos de instâncias adicionais (8A, 8B, 8C e 9A, 9B, 9C) para validar os pontos mencionados acima. No conjunto de instâncias 8A, 8B e 8C a cidade adicionada foi Ribeirão Preto, e para as instâncias 9A, 9B e 9C foram adicionadas as cidades de Ribeirão Preto e São José dos Campos. Os custos de cada velocidade para as três instâncias está apresentado na figura 22

Figura 22 – Custos de *setup*, inventário e combustível + carbono para as velocidades de 80km/h, 90km/h e 100km/h das instâncias do experimento 3.



Fonte: Autoria própria.

Em relação aos custos de produção e roteamento vemos que no conjunto de instâncias 8A, 8B e 8C, a velocidade que apresenta menor custo de roteamento é a com 80km/h (8A), com custo de 3.987,84. Nas três instâncias do conjunto 8 os custos de produção são os mesmos, de 1.150 para *setup* e 553,3 para inventário.

No conjunto de instâncias 9, a velocidade 80km/h (9A) apresenta novamente o menor custo de roteamento de 5.654,49. É interessante observar que neste caso o custo de *setup* é 975, um valor maior que nas velocidade 90km/h (9B) e 100km/h (9C), de 725, e o valor de inventário é 951,5, valor menor que as velocidades de 90km/h e 100km/h, isso se dá devido ao sequenciamento das rotas em comparação com a produção. Os

custos totais de produção para cada velocidade do conjunto de instâncias 9 são: 1.926,54 para 9A (80km/h), 1.859,12 para 9B (90km/h) e 1.858,80 para 9C (100km/h). As velocidades 90km/h e 100km/h por serem maiores permitem uma melhor sinergia entre o sequenciamento das rotas, que permite um melhor sequenciamento da produção. No entanto, ao analisarmos os custos de produção + roteamento, a velocidade que possui menor custo ainda é a de 80km/h (9A), devido a seu ganho nos custos de roteamento.

O detalhamento dos custos de Combustível e Carbono os valores estão apresentados na tabela 25 para o conjunto de instâncias 8 e tabela 26 para o conjunto de instâncias 9.

Vemos nessas instâncias que o impacto do motor do veículo é menor com o aumento da velocidade: no conjunto de instâncias 8 é de 220,70 (209,75 de combustível + 10,95 de carbono) para 8A (80km/h), de 196,18 (186,45 de combustível + 9,73 de carbono) para 8B (90km/h) e 176,56 (167,80 de combustível + 8,76 de carbono) para 8C (100km/h). E o impacto da resistência do ar é maior com o aumentar da velocidade, no conjunto de instâncias é de 220,70 (209,75 de combustível + 10,95 de carbono) para 8A (80km/h), de 196,18 (186,45 de combustível + 9,73 de carbono) para 8B (90km/h) e 176,56 (167,80 de combustível + 8,76 de carbono) para 8C (100km/h). No conjunto de instâncias 9 este comportamento se repete.

Vemos que pelo experimento a importância de considerar a seleção da velocidade mais adequada para a redução dos custos, embora ocorra uma redução dos custos provenientes do motor do veículo ao se aumentar a velocidade, os custos que vêm da resistência do ar tem uma tendência oposta e aumentam com a velocidade. Portanto, em cada cenário que dependerá das características do veículo e do atendimento das janelas de tempo, há uma velocidade que será mais otimizada para a redução da emissão de combustível e a emissão de carbono. Estas características do veículo podem ser consideradas em um modelo que considere uma frota heterogênea em relação ao potencial da emissão de CO_2 , que será discutido no capítulo seguinte.

Tabela 25 – Custos de roteamento de veículos do modelo CarbonLSMVRP para instâncias 8A, 8B e 8C

Custos	A) 80km/h	B) 90km/h	C) 100km/h
Combustível + Carbono	3.987,84	4.052,59	4.132,76
Combustível	3.790,00	3.851,54	3.927,73
Motor do Veículo	209,75	186,45	167,80
Peso do Veículo	2.444,13	2.444,13	2.444,13
Carga	816,68	816,68	816,68
Resistência ao Ar	319,44	404,29	499,12
Carbono	197,84	201,05	205,03
Motor do Veículo	10,95	9,73	8,76
Peso do Veículo	127,58	127,58	127,58
Carga	42,63	42,63	42,63
Resistência ao Ar	16,67	21,10	26,05
Distância	3.817	3.817	3.817
Kg de Carbono	376,30	382,40	389,97

Tabela 26 – Custos de roteamento de veículos do modelo CarbonLSMVRP para instâncias 9A, 9B e 9C

Custos	A) 80km/h	B) 90km/h	C) 100km/h
Combustível + Carbono	5.762,19	5.862,02	5.985,591
Combustível	5.476,33	5.578,20	5.688,65
Motor do Veículo	323,34	287,41	258,67
Peso do Veículo	3.767,68	3.767,68	3.767,68
Carga	892,89	892,89	892,89
Resistência ao Ar	492,42	623,22	769,41
Carbono	285,86	290,82	296,95
Motor do Veículo	16,88	15,00	13,53
Peso do Veículo	196,67	196,67	196,67
Carga	46,61	46,61	46,61
Resistência ao Ar	25,70	32,53	40,16
Distância	5.884	5.884	5.884
Kg de Carbono	543,71	553,15	564,81

O tempo computacional para encontrar as soluções do experimento 3 estão na tabela 27.

Tabela 27 – Tempo computacional para encontrar soluções do experimento 3

Instância	Tempo Computacional (Segundos)
7A	30,66
7B	38,27
7C	81,02
8A	3.420,80
8B	3.353,08
8C	1.955,67
9A	60.714,23
9B	4.276,51
9C	7.626,50

4.3.2 Experimento 4

Diferente do experimento anterior, onde a velocidade escolhida era utilizada durante todas as rotas, neste experimento cada arco pode ter uma velocidade diferente. É garantido nos dados que ao menos uma dessas velocidades do conjunto deve atender as janelas de tempo. A velocidade que necessariamente atende todas as janelas de tempo é 80km/h. Na instância 10A) iremos utilizar a velocidade fixa de 80km/h e na instância 10B) o conjunto de escolha das velocidades: 80km/h, 70km/h e 60km/h.

Para este experimento inicialmente iremos descrever o conjunto de instâncias 10A e 10B. Os dados particulares para estas instâncias estão apresentados na tabela 28. As cidades selecionadas são as mesmas do conjunto de instâncias 7.

Tabela 28 – Dados particulares das instâncias 10A e 10B

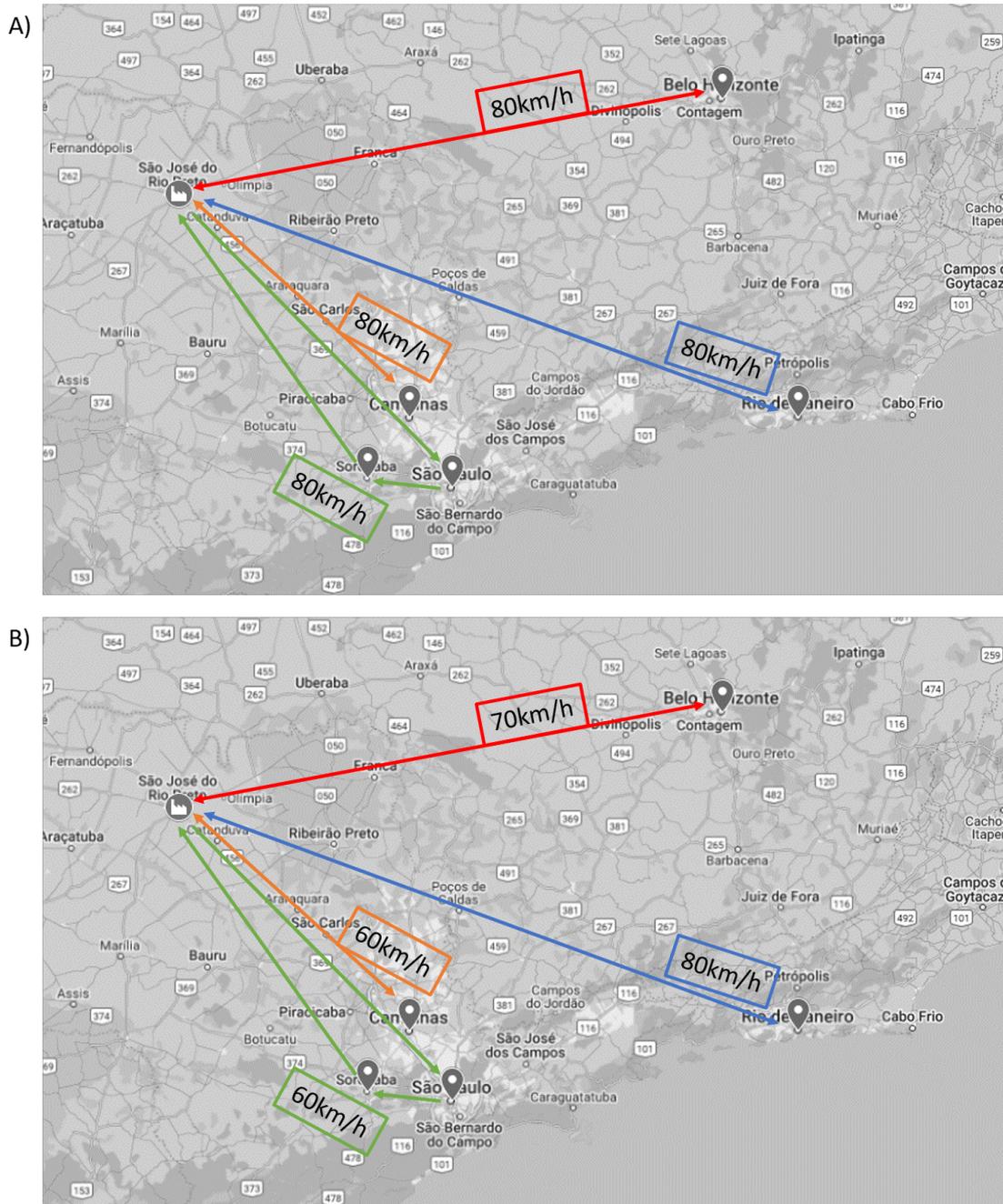
Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade	Fonte	Tipo1
\hat{c}_{ab}	Custo de <i>setup</i> do item <i>a</i> para o <i>b</i>	25	u.m.	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	P
η_{ap}	Quantidade de unidades do item <i>a</i> para produzir uma unidade do produto <i>p</i>	Anexo F	-	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	P
ζ_{ab}	Unidade de tempo para troca de produção do item <i>a</i> para <i>b</i>	Anexo F	Segundos	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	P
K_t	Capacidade de produção no período <i>t</i>	2827	Componentes	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	P
θ_v	Capacidade do veículo <i>v</i>	6350	kg	(QIU et al., 2020)	R
φ_p	Peso do produto <i>p</i>	15,20 e 30	kg	Gerado	R
d_{pi}	Demanda do produto <i>p</i> no cliente <i>i</i>	Anexo F	Produtos	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	R
p_c	Preço do carbono por kg	0,027	u.m.	(QIU et al., 2020)	RCO_2
\bar{d}_{ij}	Distância do nó <i>i</i> ao nó <i>j</i>	Figura 19	m	Gerado	RCO_2
\bar{v}^{vel}	Velocidade do veículo sob a velocidade <i>vel</i>	A) 22,22 ; B) 16,66; 19,44 e 22,22	m/s	Gerado	RCO_2

Na figura 23 A e B estão apresentadas as rotas definidas pela solução das instâncias, também estão indicadas as velocidades escolhidas para cada arco (i, j) 10A e 10B respectivamente. Verificamos que não houve alteração das rotas em relação a instância 3.

Na figura 24 estão apresentados os custos das instâncias 10A e 10B Em ambos cenários estão presentes os custos de *setup*, inventário e Combustível + Carbono, verifica-se pela figura 24 que os custos de inventário (356,4) e de trocas (625) não se alteraram nas duas instâncias. Já os custos de Combustível e Carbono são menores no cenário com velocidade variável, sendo de 3.133,71 neste cenário e 3.167,55 no cenário de 80km/h.

Na tabela 29 estão indicados os detalhamentos dos custos de Combustível + Carbono da instância 10. Os custos de roteamento possuem diferenças, novamente como no experimento 3 os custos de Peso do veículo e Carga são iguais devido as rotas serem iguais. No entanto, os custos que vêm do motor do veículo e da resistência do ar são diferentes e impactam na otimização do custo em função da melhor velocidade. Considerando o custo total dos termos impactados pela velocidade (Motor do veículo e Resistência do ar para

Figura 23 – Mapa com depósito, clientes, rotas e velocidades para as instâncias 10A e 10B

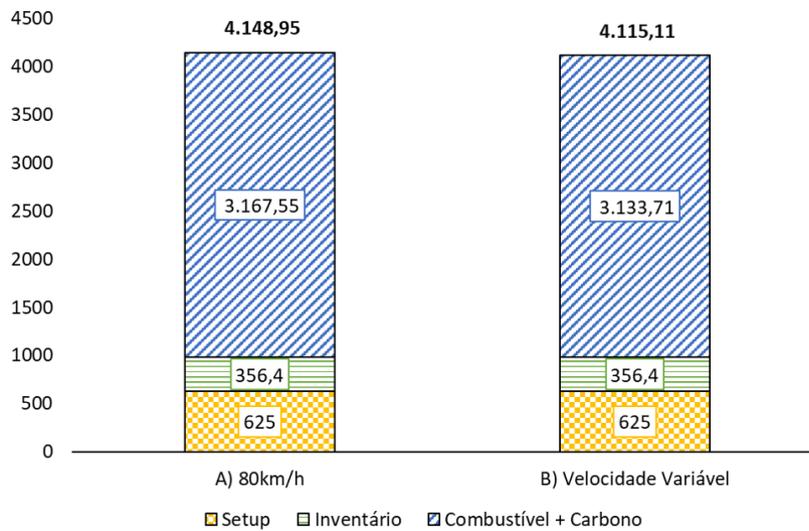


Combustível + Carbono): na instância 10A temos o valor de 461,67, e na instância 10B temos o valor de 427,83. Uma redução de 7,3% ao compararmos apenas estes custos e uma redução de 1% nos custos de Combustível + Carbono.

Em cada instância haverá uma velocidade ideal do ponto de vista de economia de energia, porem, esta velocidade pode ou não atender as janelas de tempo, com isto, observamos a importância de se ter diferentes velocidades selecionadas no modelo.

Para esse experimento, rodamos adicionalmente os conjuntos de instâncias 11A, 11B, 12A e 12B para reforçar os pontos mencionados acima. Na figura 25 estão apresentados os

Figura 24 – Custos de *setup*, inventário e combustível + carbono para as instâncias 10A e 10B



Fonte: Autoria própria.

Tabela 29 – Custos de roteamento de veículos do modelo CarbonLSMVRP para as instâncias 10A e 10B

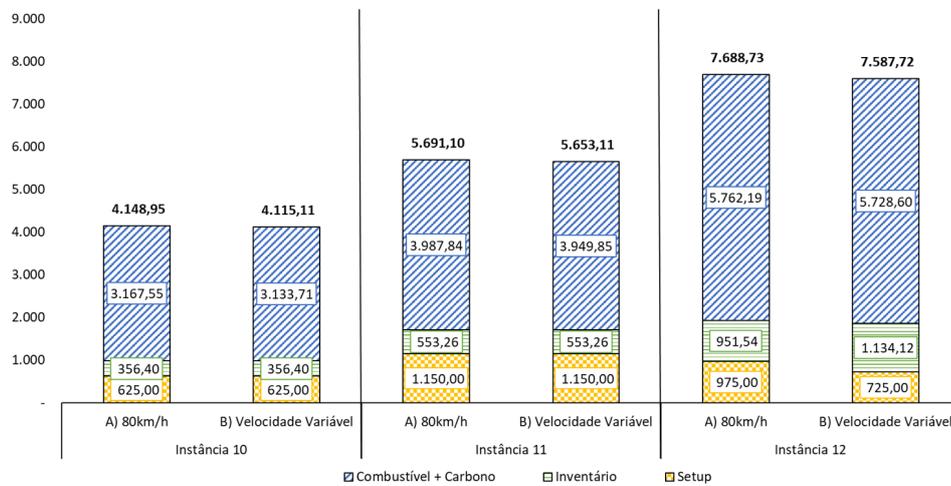
Custos	A) Velocidade Fixa: 80km/h	B) Velocidade Variável (Figura 23)
Combustível + Carbono	3.167,55	3133,71
Combustível	3.010,41	2978,24
Motor do Veículo	173,91	202,63
Peso do Veículo	2026,50	2026,50
Carga	545,13	545,13
Resistência ao Ar	264,89	203,97
Carbono	157,14	155,46
Motor do Veículo	9,08	10,58
Peso do Veículo	105,78	105,78
Carga	28,46	28,46
Resistência ao Ar	13,83	10,65
Distância	3.617	3.617
Kg de Carbono	298,89	295,69

gráficos dos três conjuntos de instâncias deste experimento.

Adicional aos custos totais, também foram gerados os detalhamentos dos custos de roteamento representado por Combustível + Carbono, estão apresentados nas tabelas 30 e 31 para os conjuntos de instâncias 11 e 12 respectivamente.

Vemos pela tabela 30 que na instância 11B o custo total de combustível + carbono é 3.949,85, isto é, 1% menor que o custo da instância 11A de 3.987,84. Já na instância 12B, o custo total de combustível + carbono é de 5.728,60, um valor 0,06% menor que o valor da instância 12A de 5.762,19. Essa diferença se assemelha as diferenças descritas nas instâncias 10A e 10B, onde os custos de Resistência do Ar são menores no cenário com a seleção da velocidade variável, e os custos de Motor do Veículos são maiores nos cenários com a velocidade fixa. No entanto, da mesma maneira, os custos de resistência do ar tem

Figura 25 – Custos de *setup*, inventário e combustível + carbono para as velocidades de 80km/h e velocidade variável das instâncias do experimento 4



Fonte: Autoria própria.

um peso maior na decisão da velocidade com o menor custo total de gasto de combustível e emissão de carbono.

Observamos então neste experimento:

- É importante considerar a velocidade variável para a minimização dos custos de roteamento, uma vez que, para cada caso haverá uma velocidade ideal do veículo, considerando suas características físicas, as características do motor e do seu local de trajeto.
- Para que essa velocidade seja selecionada é importante uma variedade que atenda as janelas de tempo dos clientes.

Tabela 30 – Custos de roteamento de veículos do modelo CarbonLSMVRP para as instâncias 11A e 11B

Custos	A) Velocidade Fixa: 80km/h	B) Velocidade Variável
Combustível + Carbono	3.987,84	3.949,85
Combustível	3.790,00	3.753,90
Motor do Veículo	209,75	243,11
Peso do Veículo	2.444,13	2.444,13
Carga	816,68	816,68
Resistência ao Ar	319,44	249,97
Carbono	197,84	195,95
Motor do Veículo	10,95	12,69
Peso do Veículo	127,58	127,58
Carga	42,63	42,63
Resistência ao Ar	16,67	13,05
Distância	3.817	3.817
Kg de Carbono	376,30	372,70

Tabela 31 – Custos de roteamento de veículos do modelo CarbonLSMVRP para as instâncias 12A e 12B

Custos	A) Velocidade Fixa: 80km/h	B) Velocidade Variável
Combustível + Carbono	5.762,19	5.728,60
Combustível	5.476,33	5.444,41
Motor do Veículo	323,34	344,64
Peso do Veículo	3.767,68	3.767,68
Carga	892,89	892,89
Resistência ao Ar	492,42	439,20
Carbono	285,86	284,20
Motor do Veículo	16,88	17,99
Peso do Veículo	196,67	196,67
Carga	46,61	46,61
Resistência ao Ar	25,70	22,93
Distância	5.884	5.884
Kg de Carbono	543,71	540,55

O tempo computacional para encontrar as soluções do experimento 4 estão na tabela 32.

Tabela 32 – Tempo computacional para encontrar soluções do experimento 4

Instância	Tempo Computacional (Segundos)
10A	30,66
10B	32,67
11A	3.420,80
11B	780,01
12A	60.714,23
12B	17.490,00

4.4 Impacto da Adição dos Custos de Carbono no *Trade off* com a Produção: Experimento 5

Este experimento tem o objetivo de avaliar a adição dos custos de carbono no modelo CarbonLSMVRP e avaliar como a inclusão destes custos impactam no *trade off* que existe entre o planejamento da produção e do roteamento de veículos. Isto é, como considerar os custos de CO_2 afetam as decisões de produção

As instâncias deste experimento se dividem da seguinte forma:

- (A) Sem custo de carbono: neste cenário o parâmetro Fator de emissão de carbono \bar{e} foi zerado, de modo que não há consideração de carbono emitido. O valor do custo de *setup* \hat{c}_{ab} foi aumentado 10 vezes. Neste cenário há apenas custos de inventário, *setup* e combustível.
- (B) Com custo de carbono: neste cenário o parâmetro Fator de emissão de carbono \bar{e} tem o valor apresentado na tabela 10 e o parâmetro Custo de emissão de carbono p_c foi aumentado 10 vezes do valor apresentado na tabela 10. O valor do custo de *setup* \hat{c}_{ab} foi aumentado 10 vezes. Neste cenário há custos de inventário, *setup* e combustível e carbono.

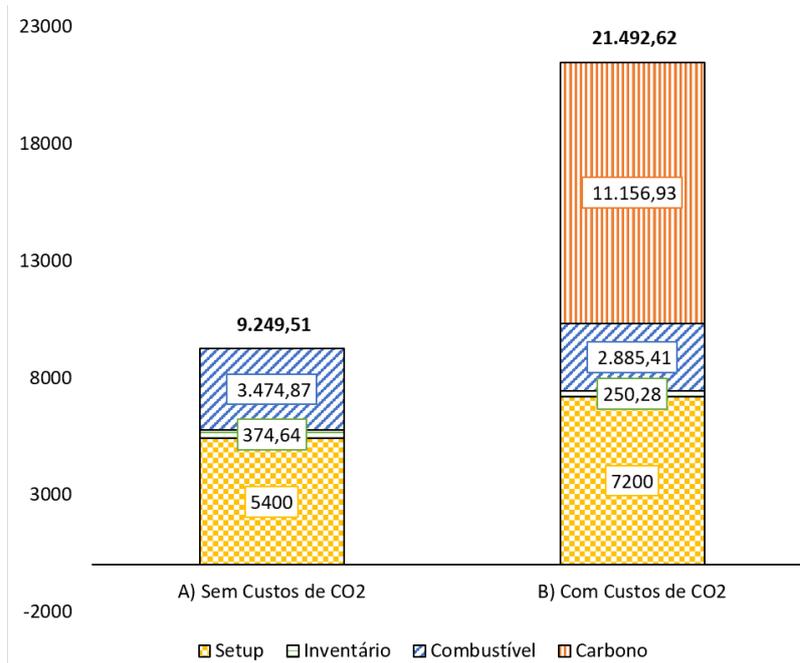
Os dados particulares das instâncias 13A e 13B estão apresentados na tabela 33.

Tabela 33 – Dados particulares às instâncias 13A e 13B

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade	Fonte	Tipo1
\hat{c}_{ab}	Custo de <i>setup</i> do item a para o b	225	u.m.	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	P
η_{ap}	Quantidade de unidades do item a para produzir uma unidade do produto p	Anexo F	-	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	P
ζ_{ab}	Unidade de tempo para troca de produção do item a para b	Anexo F	Segundos	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	P
K_t	Capacidade de produção no período t	3327	Componentes	Gerado	P
θ_v	Capacidade do veículo v	6350	kg	(QIU et al., 2020)	R
φ_p	Peso do produto p	15 até 30kg	Kg	Gerado	R
d_{pi}	Demanda do produto p no cliente i	Anexo F	Produtos	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	R
p_c	Preço do carbono por kg	2,7	u.m.	Gerado	RCO_2
\bar{d}_{ij}	Distância do nó i ao nó j	Figura 19	m	Gerado	RCO_2
\bar{v}^{vel}	Velocidade do veículo sob a velocidade vel	16,66; 19,44 e 22,22	m/s	Gerado	RCO_2

Os custos das instâncias 13A e 13B estão apresentados na figura 34, na primeira coluna (13A) estão apresentados os dados sem a adição dos custos de CO_2 aumentado 10 vezes, já na segunda coluna (13B) estão apresentados os custos com a adição dos custos de CO_2 . Para este experimento iremos separar os custos de Combustível + Carbono para visualização dos custos de forma separada, uma vez que o custo de carbono esta aumentado 10 vezes.

Figura 26 – Custos de *setup*, inventário, combustível e carbono para as instância 13A e 13B



Fonte: Autoria própria.

Pela figura 26 ao analisarmos os custos, vemos que ao considerarmos custos mais altos de CO_2 :

- Custo de *setup* aumenta de 5.400 para 7.200.
- Custo de inventário decresce de 374,64 (13A) para 250,28 (13B);
- Custo de combustível decresce de 3.474,87 (13A) para 2.887,41 para (13B);

Essas alterações decorrem do aparecimento da adição dos custos de carbono. Com os novos custos de CO_2 o modelo precisa priorizar a otimização do roteamento ao invés da produção, com isso as rotas são otimizadas para a redução do gasto de combustível, logo ocorrem mais *setups* para a otimização do roteamento. A redução do inventário é uma consequência do aumento do número de trocas. Como agora os custos de roteamento são maiores pela presença do carbono, e o combustível é a fonte da emissão do carbono, ele é minimizado e seu custo é reduzido.

Na tabela 34 estão apresentados os detalhamentos dos custos de Combustível e Carbono.

Na tabela 34 vemos que a distância da instância 13A é de 3.993, enquanto na instância 13B é de 3.089, esta redução de 904km mostra que de fato, apesar do custo de combustível em si ser menor que o de produção, o fato de haverem custos de carbono faz com que o roteamento de veículos influencie mais nas decisões do modelo. Isso também

Tabela 34 – Custos de combustível e carbono para as instâncias 13A e 13B

Custos	A) Sem Custos de CO_2	B) Com Custos de CO_2
Combustível + Carbono	3.474,87	14.042,35
Combustível	3.474,87	2.885,41
Motor do Veículo	195,05	150,89
Peso do Veículo	2.554,26	1.975,95
Carga	689,36	730,53
Resistência ao Ar	36,25	28,04
Carbono	-	11.156,93
Motor do Veículo	-	583,43
Peso do Veículo	-	7.640,35
Carga	-	2.824,72
Resistência ao Ar	-	108,4
Distância	3.993	3.089
Kg de Carbono	-	21.220,89

se reflete na redução dos custos de combustível que decrescem de 3.474,87 par 2.855,41. Quando observamos a composição dos custos de combustível vemos que:

- Motor do veículo decresce de 195,05 para 150,89;
- Peso do veículo decresce de 2554,26 para 1975,95;
- Carga aumenta de 689,36 para 730,53;
- Resistência ao Ar decresce de 36,25 para 28,04;

Os termos de motor do veículo, peso do veículo e resistência ao ar decrescem devido a redução da distância percorrida, já a carga aumenta devido as escolhas de carregar o veículo com mais entregas de uma vez para reduzir as distâncias percorridas.

Na figura 27 está apresentada as soluções da instância 13A Sem Carbono (pintado de azul) e 13B Com Carbono (pintado de verde). Primeiramente são divididos os períodos e logo abaixo as etapas de produção e roteamento. Na parte de produção, estão indicadas as trocas realizadas em cada cenário através de setas, onde cada retângulo representa um componente. As quantidades abaixo de cada componente são referente as quantidades produzida e inventários do componente. Na parte de roteamento as rotas estão representadas pelos círculos e as informações abaixo são de distância percorrida entre os clientes, a carga carregada e a demanda de cada componente (1, 2 e 3).

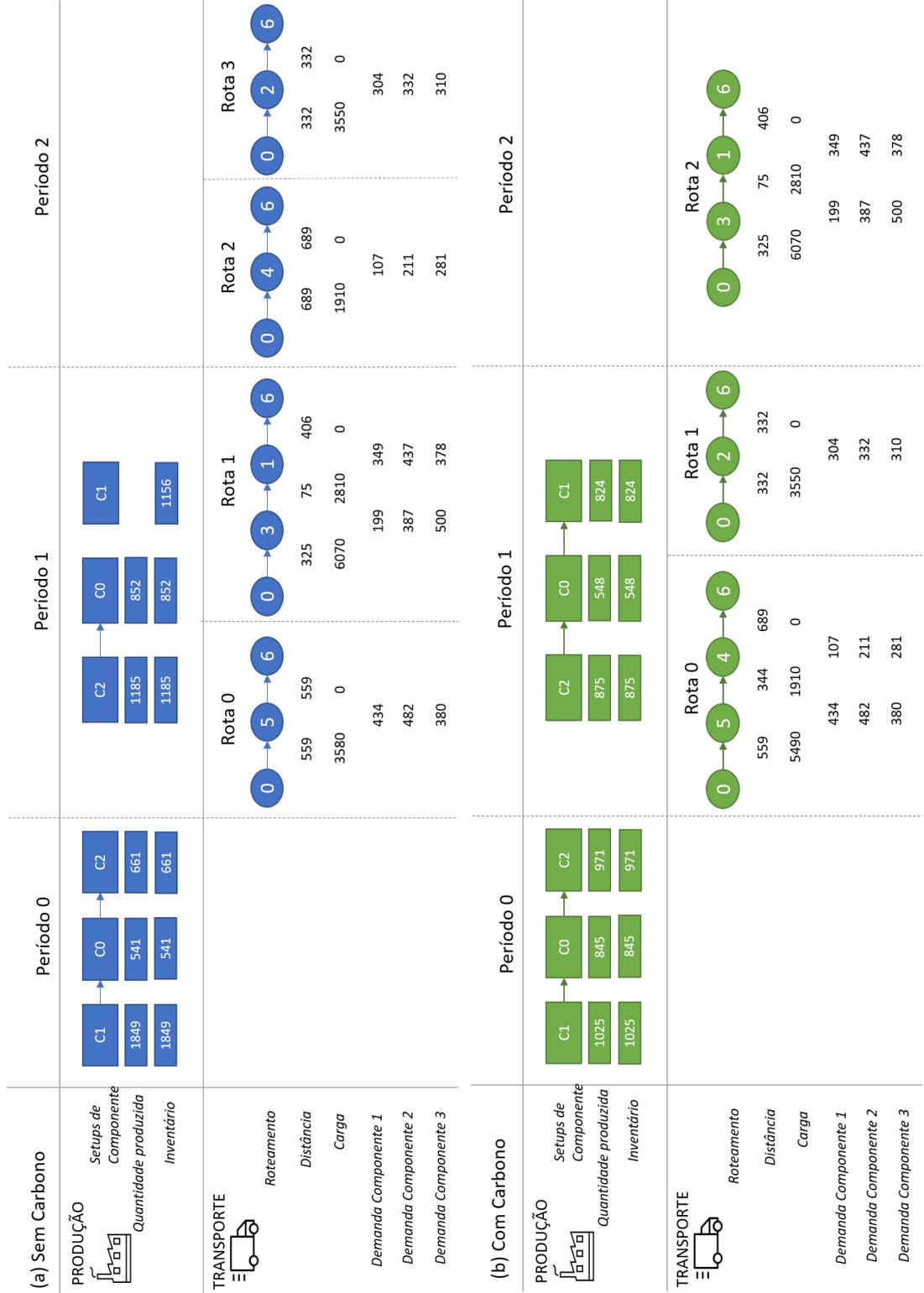
Conforme explicado no capítulo 3 junto ao modelo, no primeiro período não haverão rotas percorridas, uma vez que as entregas são feitas com o inventário do período anterior. Seguindo a mesma lógica no último período não há produção, uma vez que é onde são feitas as últimas entregas.

Ao se comparar os dois cenários na figura, podemos notar que na instância 13A é traçada uma rota a mais, com distância total percorrida de 3.993km, enquanto na instância

13B é realizada uma rota a menos com a distância total de todas as rotas de 3.089km, essa redução evidencia o peso de CO_2 . Para o *setup* ocorre o inverso, em 13A são feitos 3 trocas de componente ao todo, e em 13B são feitos 4, um a mais no período 1.

Isso indica que considerar explicitamente custos de emissão de carbono, pode alterar as decisões de produção. É importante observar que, embora este experimento computacional tenha custos fictícios, uma vez que os custos de *setup* e carbono são bem elevados, mostramos no apêndice A que tem sido uma realidade cada dia mais os custos de crédito de carbono terem valores maiores, junto das penalizações que podem ocorrer pelas emissões de CO_2 .

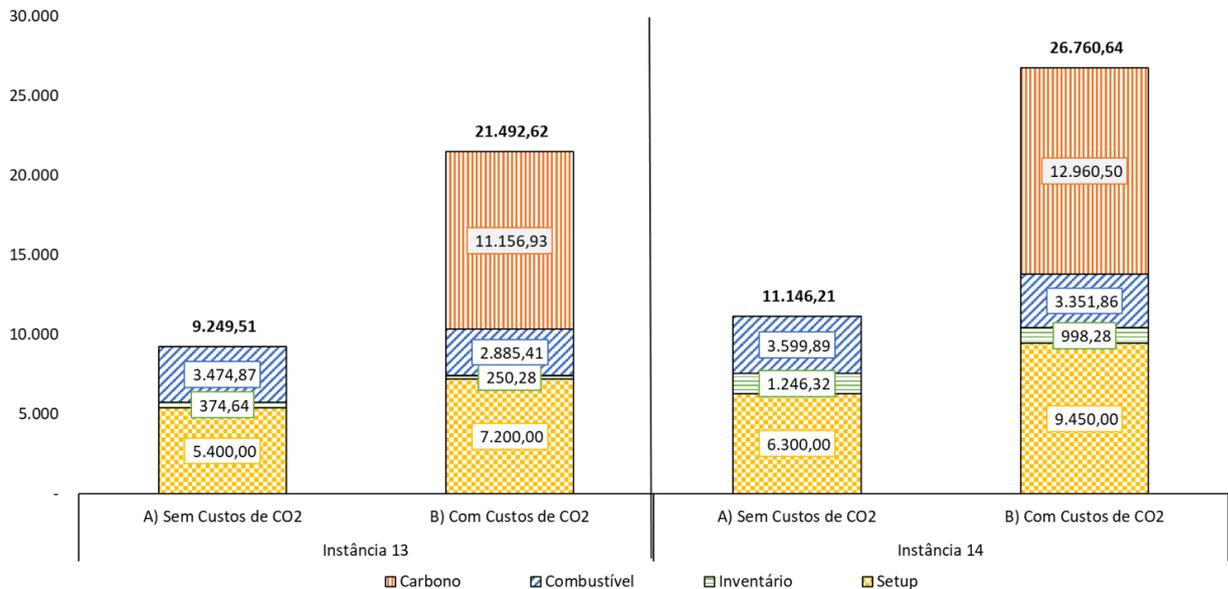
Figura 27 – Diagrama com representação dos processos das instâncias 13A e 13B



Fonte: Autoria própria.

As instâncias 14A e 14B são similares as conjunto de instâncias 13, porém a mais um período, um cliente, uma rota e dois componentes. Elas foram criadas para reforçar a observação dos pontos descritos com base nas instâncias 13A e 13B e verificar como é o comportamento em uma instância maior. Na figura 28 estão apresentados os custos dos conjuntos de instâncias 13 e 14.

Figura 28 – Custos de *setup*, inventário, combustível e carbono para as instâncias do experimento 5



Fonte: Autoria própria.

Podemos observar pela figura 28 que, comparando as instâncias 14A e 14B houve um aumento no custo de troca, de 6.300 para 9.450, o que indica mais *setups* sendo realizados. Vemos também a redução do custo de inventário de 1.246,32 para 998,28 e de combustível de 3.559,89 para 3.351,86. Esta variação, como no conjunto de instâncias 13 indica uma priorização do roteamento, com rotas menores e mais trocas ocorrendo para antecipar esse roteamento.

Na tabela 35 estão apresentados os custos de Combustível e Carbono de forma detalhada. Vemos que a distância é reduzida de 4248km na instância 14A para 3627km na instância 14B, isto é, 621km menor. Quando olhamos os custos de combustível vemos que todos os termos reduzem devido a este decréscimo da distância percorrida, com exceção da carga, que aumenta de 746,71 para 819,82, devido ao caminhão percorrer os trajetos com mais carga para otimizar a distância percorrida.

Essa análise se reflete na figura 29, onde novamente há um *setup* a mais realizado no período 1. Em relação as rotas, agora são realizadas 4 rotas para cada cenário, porém há diferença na distância percorrida.

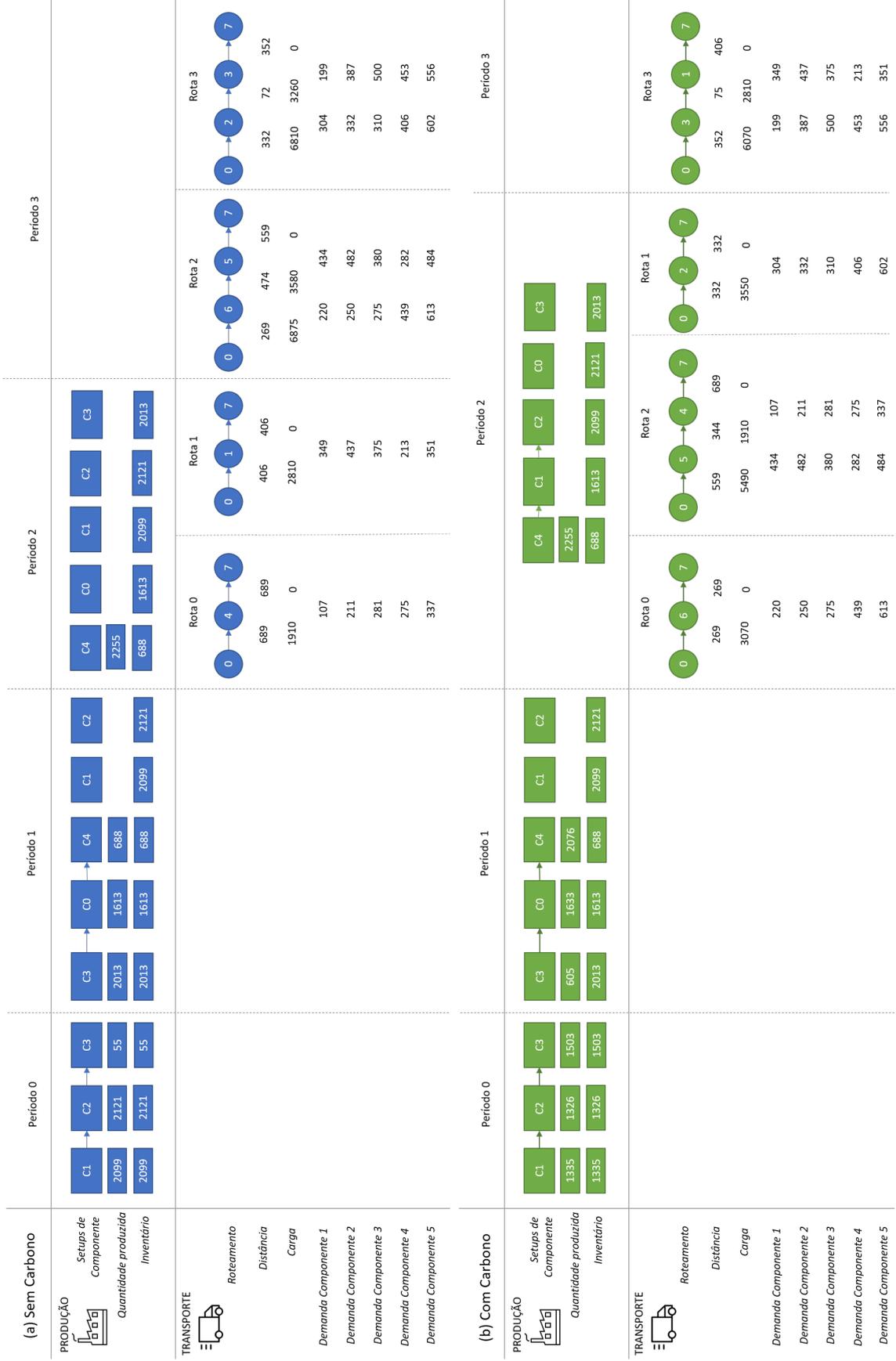
Tabela 35 – Custos de combustível e carbono para as instâncias 14A e 14B

Custos	A) Sem Custos de CO_2	B) Com Custos de CO_2
Combustível + Carbono	3.599,89	16.312,385
Combustível	3.599,89	3.351,86
Motor do Veículo	199,78	179,02
Peso do Veículo	2.616,26	2.320,10
Carga	746,71	819,82
Resistência ao Ar	37,135	32,93
Carbono	-	12.960,52
Motor do Veículo	-	692,20
Peso do Veículo	-	8.971,01
Carga	-	3.169,97
Resistência ao Ar	-	127,32
Distância	4.248	3.627
Kg de Carbono	-	24.651,38

O aumento de trocas indica que foi necessário a antecipação da produção de componentes para consolidação de demanda que atendam uma rota menor. Como pode ser visto na figura 29.

Outro ponto que esse impacto traz, é a discussão do quanto o valor do carbono pode impactar nas decisões de planejamento, trazendo a discussão para um nível político e de tomada de decisão para os governos e organizações que desejam incentivar a redução das emissões.

Figura 29 – Diagrama com representação dos processos das instâncias 14A e 14B



Fonte: Autoria própria.

O tempo computacional para encontrar as soluções do experimento 5 estão na tabela 36.

Tabela 36 – Tempo computacional para encontrar soluções do experimento 5

Instância	Tempo Computacional (Segundos)
13A	23,97
13B	6,14
14A	6.305,45
14B	1.169,33

5 FROTA HETEROGÊNEA EM RELAÇÃO A EMISSÃO DE CO_2

No trabalho de (HOFF et al., 2010) é apontado que em problemas do mundo real é importante se considerar frotas heterogêneas, devido a sua presença comum nas organizações para atendimento das demandas dos clientes. Outro ponto importante é que no caso das organizações, em geral os caminhões que compõem a frota são comprados em períodos diferentes, e com isso podem ter diferenças nos modelos, tamanhos e idades.

Neste capítulo iremos apresentar uma extensão do modelo CarbonLSMVRP, onde é adicionando uma frota heterogênea, não apenas em relação a capacidade do veículo, como feito no anteriormente mas em relação tipo de motor e ao potencial de emissão de CO_2 dos veículos. Esta adição é importante para retratar o cenário das indústrias que tem frotas de diferentes tipos. O modelo com esta adição será denominado de HeF-CarbonLSMVRP (*Heterogeneous fleet carbon lot-scheduling multi-vehicle routing problem*).

A tabela 37 mostra as variações notes teste computacionais realizados com o novo modelo.

Tabela 37 – Experimentos realizados com sua descrição e instâncias que são englobadas

Objetivo	Exp.	Descrição do Experimento	Inst.	Modelos
Impacto de considerar uma frota heterogênea em relação a emissão de CO_2	6	Verificar quais os impactos nos custos da consideração de uma frota heterogênea em relação a emissão de CO_2 . Para isto serão comparados quatro cenários, um A) apenas com veículos leves, B) apenas com veículos de porte médio, C) apenas com veículos de porte pesado e D) com uma frota heterogênea com os três tipos de veículo.	15A,15B,15C e 15D 16A,16B,16C e 16D	HeF-CarbonLSMVRP

Exp. = Experimento; Inst. = Instâncias

5.1 Modelo HeF-CarbonLSMVRP

Para que o modelo considere uma frota heterogênea em relação a emissão de carbono, foram necessárias alterações no modelo CarbonLSMVRP. Inicialmente foram adicionados índices de veículo v aos parâmetros que descrevem características do veículo para apresentar a variação de emissão de CO_2 de cada um, são eles: peso do veículo (\bar{w}_v), capacidade do veículo ($\bar{\delta}_v$), fator de fricção do motor do veículo (\bar{k}_v), velocidade do motor do veículo (\bar{N}_v), deslocamento do motor do veículo (\bar{V}_v), coeficiente de arrasto aerodinâmico do veículo (\bar{C}_{dv}) e a área frontal do veículo (\bar{A}_v).

Também foram feitas adições de índices de veículo às variáveis que acompanham esses parâmetros na função objetivo. Essa comparação das variáveis está apresentada

na tabela 38. Vemos na tabela que o índice v foi adicionado às variáveis. Ressaltamos que a variável α_{vr} , que era a responsável por fazer a seleção dos veículos no modelo CarbonLSMVRP não existe no modelo HeF-CarbonLSMVRP.

Tabela 38 – Variáveis modificadas para o modelo HeF-CarbonLSMVRP

CarbonLSMVRP	HeF-CarbonLSMVRP
Q_{prt}	Q_{pvrt}
f_{ijr}	f_{ijvr}
μ_{ir}	μ_{ivr}
w_{ijr}	w_{ijvr}
ϕ_{irt}	ϕ_{ivrt}
l_{ijr}^{vel}	l_{ijvr}^{vel}

A função objetivo também foi modificada para refletir essas alterações nos parâmetros e variáveis. Na fórmula 5.1 está apresentada a função objetivo considerando a frota heterogênea. Vemos que agora as variáveis e os parâmetros que descrevem o gasto de combustível e a emissão de carbono possuem o índice de veículo v .

$$\begin{aligned}
& \min \underbrace{\sum_{a \in C} \sum_{t \in T} h_a I_{at}}_{\text{Inventário}} + \underbrace{\sum_{a \in C} \sum_{b \in C} \sum_{t \in T} \hat{c}_{ab} z_{abt}}_{\text{Setup}} \\
& + \underbrace{(p_f + \bar{e}p_c)}_{\text{Taxas Dos Custos}} \left(\underbrace{\sum_{v \in V} \sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{k}_v \bar{N}_v \bar{V}_v \bar{d}_{ij} \sum_{vel} l_{ijvr}^{vel} / \bar{v}^{vel}}_{\text{Resistência Motor}} + \underbrace{\sum_{v \in V} \sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{w}_v \bar{\alpha} \bar{d}_{ij} \bar{\gamma} w_{ijvr}}_{\text{Peso Veículo}} \right) \\
& + \underbrace{\sum_{v \in V} \sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{\alpha} \bar{d}_{ij} \bar{\gamma} f_{ijvr}}_{\text{Carga}} + \underbrace{\sum_{v \in V} \sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{\beta}_v \bar{d}_{ij} \bar{\gamma} \sum_{vel} l_{ijvr}^{vel} (\bar{v}^{vel})^2}_{\text{Resistência Do Ar}}
\end{aligned} \tag{5.1}$$

Em relação às restrições de produção a restrição 3.2 foi alterada para 5.2 e a restrição 3.3 foi alterada para 5.3. Ambas novas restrições possuem a mesma função conforme descrito no capítulo 3, no entanto, foram alteradas devido a modificação na variável Q_{pvrt} , que agora possui o índice de veículo v . As demais restrições de produção, de 3.4 até 3.9 permanecem as mesmas.

$$\underbrace{I_{a,t-1}}_{\text{Estoque do período anterior}} + \underbrace{x_{at}}_{\text{Quantidade produzida}} = \underbrace{\sum_{v \in V} \sum_{r=1}^R \sum_{p \in P} \eta_{ap} Q_{pvrt}}_{\text{Demanda a ser atendida}} + \underbrace{I_{at}}_{\text{Estoque atual}} \tag{5.2}$$

$a \in C, t \in T.$

$$\underbrace{I_{a,t-1}}_{\text{Estoque do período anterior}} \geq \underbrace{\sum_{v \in V} \sum_{r=1}^R \sum_{p \in P} \eta_{at} Q_{pvrt}}_{\text{Demanda a ser atendida}} \quad a \in C, t \in T. \tag{5.3}$$

As restrições que descrevem o roteamento, incluindo as restrições com as variáveis de carbono, todas tiveram alteração devido a adição do índice de veículo v . Um exemplo pode ser observado na mudança das restrições 3.10 e 3.11 para 5.4 e 5.5 respectivamente, vemos que em ambas há mudança na variável, que agora é w_{ijvr} , e a restrição agora varia no conjunto V .

$$\underbrace{\sum_{j \in \bar{C} \cup \{n+1\}} w_{0jvr}}_{\text{Rotas que saem do depósito 0}} = 1 \quad v \in V, r = 1, \dots, R. \quad (5.4)$$

$$\underbrace{\sum_{i \in \bar{C} \cup \{0\}} w_{i(n+1)vr}}_{\text{Rotas que voltam ao depósito n+1}} = 1 \quad v \in V, r = 1, \dots, R. \quad (5.5)$$

Esta adição do índice v e da variação no conjunto V ocorre para todas as restrições de roteamento. Todas as restrições de 3.12 até 3.31 foram mantidas com exceção da restrição 3.24 que não existe no modelo HeF-CarbonLSMVRP, uma vez que a variável α_{rv} não existe nesse modelo. A variável binária era 1 caso um veículo v realizasse uma rota r , como agora as variáveis possuem o índice v , não é necessário uma variável adicional.

Destacamos as restrições 5.6 e 5.7 que foram modificadas devido á essa remoção da variável α_{rv} . A restrição 5.6 tem a mesma função da restrição 3.25, que é responsável por garantir que um veículo só pode iniciar uma rota $r + 1$ após ele finalizar uma rota r . E a restrição 5.7 tem a mesma função da restrição 3.26, cuja função é garantir que cada veículo não exceda sua respectiva capacidade.

$$\underbrace{\mu_{0v(r+1)}}_{\text{Saída do depósito em } r+1} \geq \underbrace{\mu_{(n+1)vr}}_{\text{Chegada no depósito em } r} - \underbrace{\bar{\delta}_{(n+1)|T|} \left(1 - \sum_{j \in \bar{C}} w_{0jv(r+1)}\right)}_{\substack{0 \text{ se o veículo } v \text{ está alocado na rota } r+1}} \quad (5.6)$$

$$v \in V, r = 1, \dots, R.$$

$$\underbrace{\sum_{p \in P} \varphi_p \left(\sum_{t \in T} Q_{pvr} \right)}_{\text{Peso da carga carregada pelo veículo } v} \leq \underbrace{\theta_v}_{\text{Capacidade do veículo } v} \quad v \in V, r = 1, \dots, R. \quad (5.7)$$

Também foi adicionada uma nova restrição 5.8, que é responsável por delimitar o número de saídas do depósito (w_{0jvr}) em função do número de rotas R

$$\underbrace{\sum_{v \in V} \sum_{r=1}^R \sum_{j \in \bar{C}} w_{0jvr}}_{\text{Número de saídas do depósito}} \leq \underbrace{|R|}_{\text{Número de Rotas}} \quad (5.8)$$

O modelo completo está apresentado no Anexo B.

5.2 Frota heterogênea em relação a emissão de CO_2 : Experimento 6

Para os experimentos deste capítulo iremos utilizar como referência os dados de (KOÇ et al., 2014), que define um cenário com três tamanhos de veículos, veículos de porte leve, médio e pesado. Os dados estão apresentados na tabela 39.

Tabela 39 – Parâmetros dos veículos de porte leve, médio e pesado

Parâmetro	Veículo porte leve	Veículo porte médio	Veículo porte pesado
\bar{w}_v (kg)	3.500	5.500	14.000
$\bar{\delta}_v$ (kg)	4.000	12.500	26.000
\bar{k}_v (kJ/rev/l)	0,25	0,20	0,15
\bar{N}_v (rev/s)	38,34	36,67	30,00
\bar{V}_v (l)	4,5	6,9	10,5
\bar{C}_{dv}	0,6	0,7	0,9
\bar{A}_v (m ²)	7	8	10

Inicialmente apresentaremos o conjunto de instâncias 15 em detalhes. Em relação aos dados das instâncias manteremos as referências apresentadas no capítulo 4, com exceção dos dados de parâmetros de veículos apresentados na tabela 39, que agora variam. Para este conjunto de instância utilizaremos os dados da instância 10B.

Os grupos de instância se dividem da seguinte forma:

- Instância A: três veículos de porte leve;
- Instância B: três veículos de porte médio;
- Instância C: três veículos de porte pesado;
- Instância D: um veículo de porte leve, um veículo de porte médio e um veículo de porte pesado.

Com base nestes, dados as instâncias do modelo foram resolvidas. Para a instância 15A, a solução é infactível pois, a demanda dos clientes é maior que a capacidade do veículo, e por não ser possível entregas fracionadas, não há solução. Isso indica que é importante uma frota diversificada para flexibilizar o atendimento dos clientes em caso de demandas maiores.

Para as instâncias 15B, 15C, 15D foi possível encontrar solução e na figura 30 estão apresentadas as rotas definidas para elas. Observamos na figura que as rotas são diferentes entre as instâncias. Em 15B são definidas 5 rotas que totalizam 4.676, na instância 15C são feitas 3 rotas que totalizam 3.089km e na instância 15D são feitas 4 rotas que totalizam 4.064km. O principal motivo para a diferenciação das rotas é a capacidade dos veículos, uma vez que a capacidade do veículo médio é de 12.500kg e a capacidade dos veículos

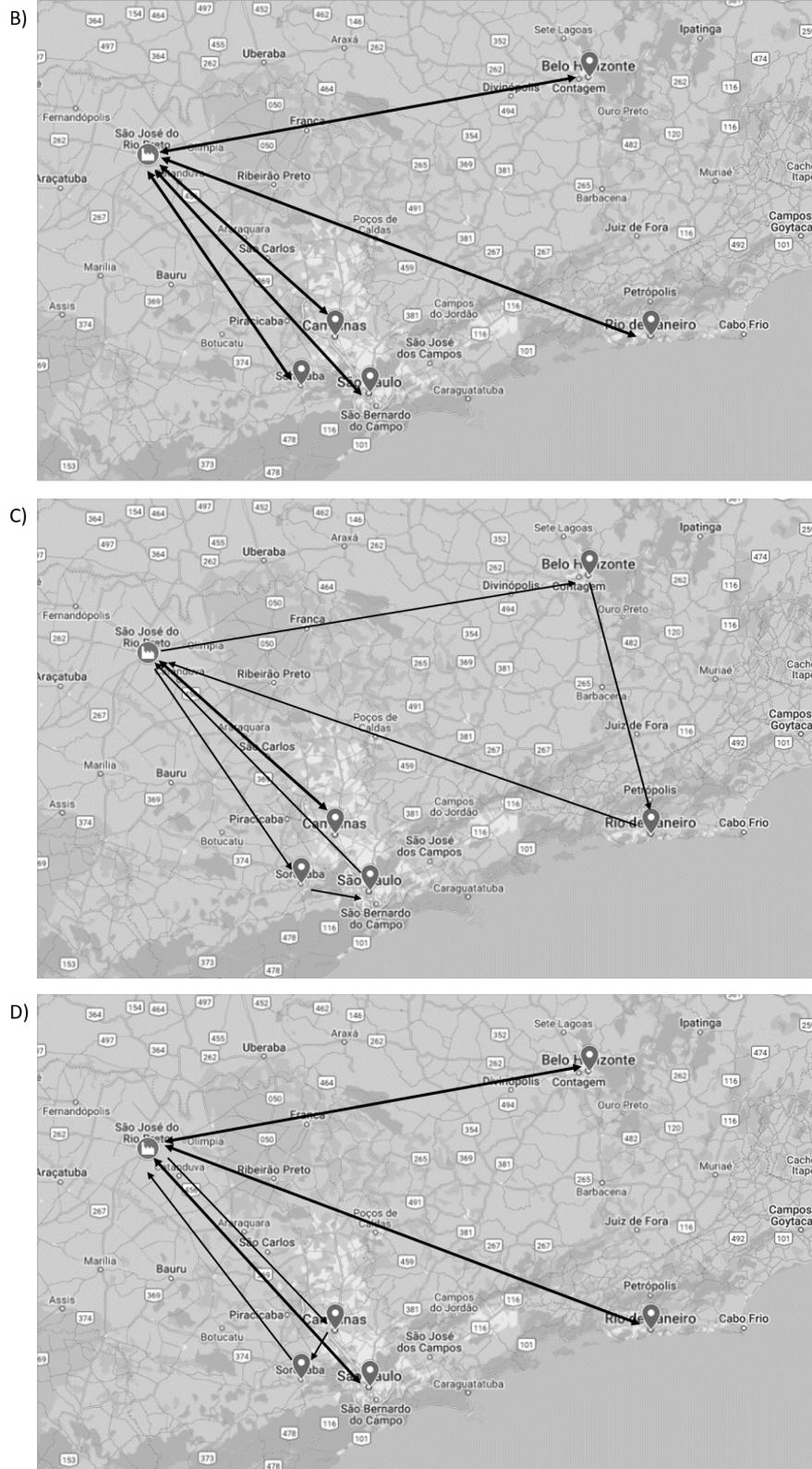
Tabela 40 – Dados particulares as instâncias 15A, 15B, 15C e 15D

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade	Fonte	Tipo1
\hat{c}_{ab}	Custo de <i>setup</i> do item <i>a</i> para o <i>b</i>	25	u.m.	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	P
η_{ap}	Quantidade de unidades do item <i>a</i> para produzir uma unidade do produto <i>p</i>	Anexo F	-	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	P
ζ_{ab}	Unidade de tempo para troca de produção do item <i>a</i> para <i>b</i>	Anexo F	Segundos	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	P
K_t	Capacidade de produção no período <i>t</i>	2827	Componentes	(MIRANDA; MORABITO; FERREIRA, 2019)	P
\bar{w}_v	Peso do veículo	Tabela 39	kg	(KOÇ et al., 2014)	R
$\bar{\delta}_v$	Capacidade do veículo	Tabela 39	kg	(KOÇ et al., 2014)	R
\bar{k}_v	Fator de fricção do motor do veículo	Tabela 39	kJ/rev/l	(KOÇ et al., 2014)	R
\bar{N}_v	Velocidade do motor do veículo	Tabela 39	rev/s	(KOÇ et al., 2014)	R
\bar{V}_v	Deslocamento do motor do veículo	Tabela 39	l	(KOÇ et al., 2014)	R
\bar{C}_{dv}	Coefficiente de arrasto aerodinâmico do veículo	Tabela 39	-	(KOÇ et al., 2014)	R
\bar{A}_v	Área frontal do veículo	Tabela 39	m ²	(KOÇ et al., 2014)	R
φ_p	Capacidade consumida de cada veículo por unidades de produtos (peso do produto) <i>p</i> carregadas	15,20 e 30	kg	Gerado	R
d_{pi}	Demanda do produto <i>p</i> no cliente <i>i</i>	Anexo F	Produtos	Miranda, 2019	R
p_c	Preço do carbono por kg	0,027	u.m.	(QIU et al., 2020)	R CO_2
\bar{d}_{ij}	Distancia do nó <i>i</i> ao nó <i>j</i>	Figura 19	m	Gerado	R CO_2
\bar{v}^{vel}	Velocidade do veículo sob a velocidade vel	16,66; 19,44 e 22,22	m/s	Gerado	R CO_2

pesados é de 26.000kg, possibilitando que seja consolidada no veículo cargas para mais clientes.

A figura 31 complementa essa análise, indicando o sequenciamento das rotas e quais veículos são utilizados em cada rota. Vemos que os veículos médios realizam 5 rotas, os veículos pesados 3 rotas e o modelo com seleção de veículos diferente realiza 4 rotas, sendo duas destas feitas com veículos leves. Nesta figura, 0 e 6 são o depósito.

Figura 30 – Mapas das rotas das instâncias 15B, 15C e 15D



Fonte: Autoria própria.

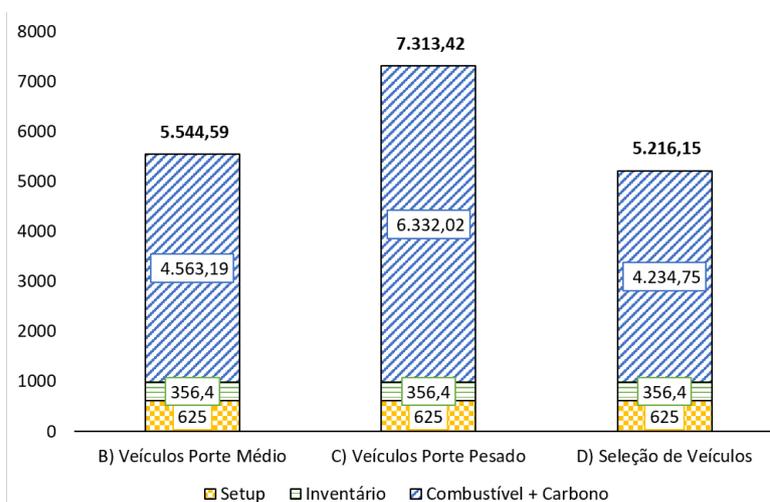
Figura 31 – Rotas e veículos utilizados em cada rota para as instâncias 15B, 15C e 15D

	Rota 1 Veículo 1	Rota 1 Veículo 2	Rota 1 Veículo 3	Rota 2 Veículo 1	Rota 2 Veículo 2
15B) Roteamento	0 → 4 → 6	0 → 5 → 6	0 → 4 → 6	0 → 3 → 6	0 → 1 → 6
Porte Veículo	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio
15C) Roteamento	0 → 3 → 1 → 6	0 → 5 → 4 → 6	0 → 2 → 6		
Porte Veículo	Pesado	Pesado	Pesado		
15D) Roteamento	0 → 4 → 6	0 → 5 → 6	0 → 2 → 3 → 6	0 → 1 → 6	0 → 6
Porte Veículo	Leve	Médio	Pesado	Leve	

Fonte: Autoria própria.

Na figura 32 vemos os custos de cada instância.

Figura 32 – Custos de combustível e carbono para as instâncias 15B, 15C e 15D



Fonte: Autoria própria.

Nas três instâncias os custos de inventário e *setup* são os mesmos, 356,4 e 625 respectivamente. Em relação aos custos de roteamento, na instância 15D temos o menor valor, 3.738,67 u.m., o que indica que a seleção de veículos pode reduzir os custos. A instância 15C possui o maior valor, de 5.345,69, o que indica que realizar menos rotas consolidadas, não necessariamente é o que irá gastar menos combustível.

Isto nos sugere que, não necessariamente se um veículo mais pesado possuir mais capacidade e conseguir consolidar mais carga e realizar menos rotas, haverá um menor consumo de combustível. Portanto, a consideração de uma frota heterogênea pode auxiliar na redução dos custos.

Na tabela 41 temos os custos detalhados do roteamento de veículos. Os valores da instância 15A estão zerados por ser uma instância infactível.

Tabela 41 – Custos de roteamento de veículos para instâncias 15A, 15B, 15C e 15D

Custos	A) Porte Leve	B) Porte Médio	C) Porte Pesado	D) Um de cada
Combustível + Carbono	-	4.563,19	6.332,02	4.234,75
Combustível	-	4.336,81	6.017,89	4.024,67
Motor do Veículo	-	468,78	288,62	363,76
Peso do Veículo	-	2.593,37	4.360,87	2.460,26
Carga	-	682,6	735,07	701,79
Resistência ao Ar	-	592,07	633,32	498,86
Carbono	-	226,38	314,13	210,09
Motor do Veículo	-	24,47	15,07	18,99
Peso do Veículo	-	135,37	227,64	128,43
Carga	-	35,63	38,37	36,63
Resistência ao Ar	-	30,91	33,06	26,04
Distância	-	4.676	3.089	4.064
Kg de Carbono	-			

Vemos que o maior impacto nas três instâncias em relação ao custo vem do peso do veículo, de 2.728,75 (2.593,37 + 135,37) para a instância 15B, 4.588,51 (4.360,87 + 227,64) para 15C e 2.588,69 (2.460,26 + 128,43) para a instância 15D. Este é o principal motivo dos veículos de porte pesado possuírem um maior custo de roteamento. Observamos que embora os custos de motor do veículo possuam o menor valor (288,62), o impacto do peso gera o maior custo de todas instâncias do conjunto.

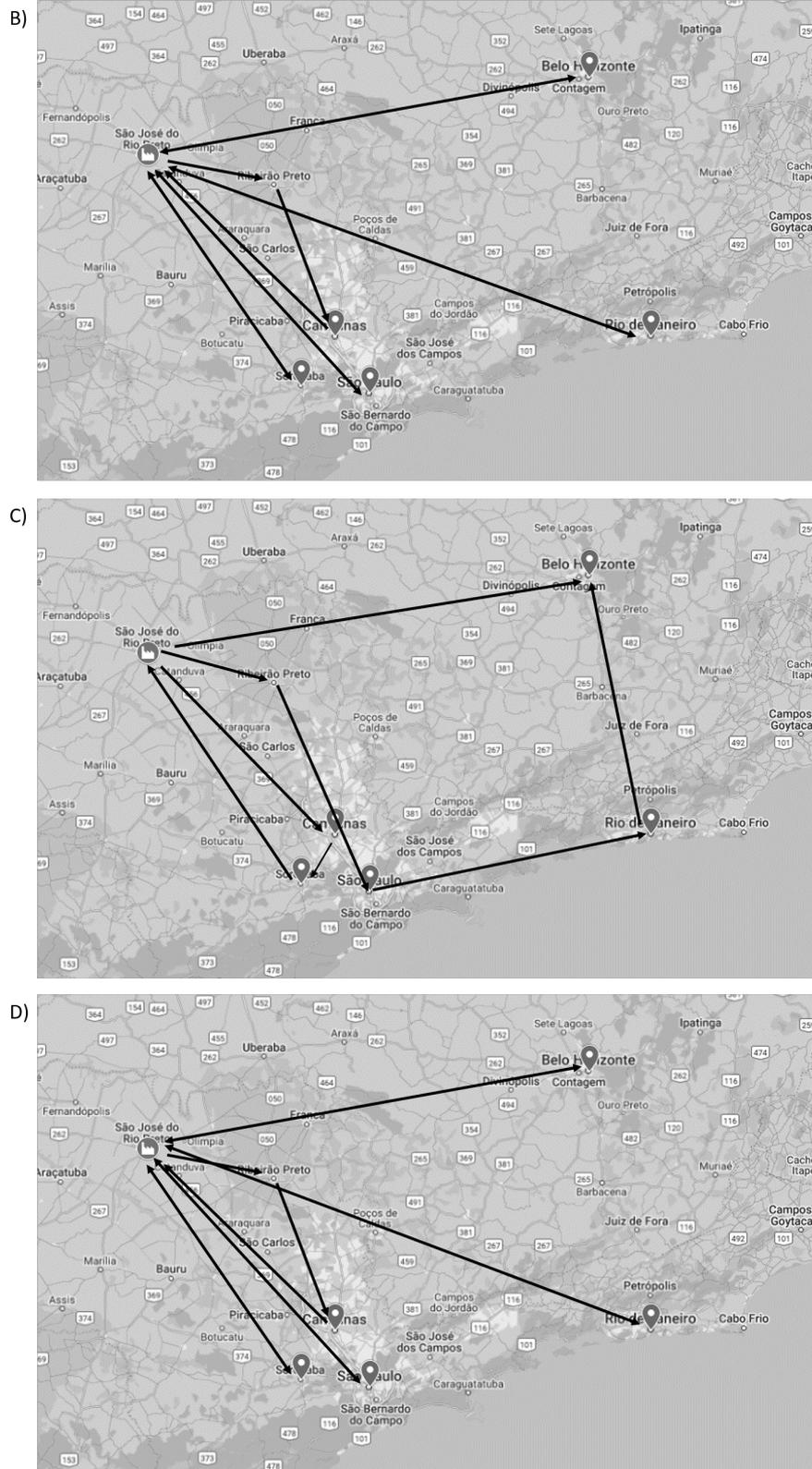
É interessante observarmos que, por mais que a instância 15C possua um custo de gasto de combustível e emissão de carbono maior que a instância 15B, esta última possui maior gasto proveniente do motor do veículo, de 493,25 (468,78+24,47), este valor ocorre devido a maior distância percorrida. Em contrapartida, esta instância possui o menor valor proveniente da carga, de 718,23 (682,60+35,63), uma vez que o veículo por mais que percorra maiores trajetos, percorre com menos carga consolidada. Notamos que percorrer uma distância maior, ao mesmo tempo que exige maior gasto proveniente do motor do veículo, pode reduzir o gasto pela carga carregada pelo veículo.

Adicionalmente rodamos o conjunto de instâncias 16A, 16B, 16C e 16D. Estas instâncias em relação ao conjunto de instâncias 15 possui um período a mais, um cliente a mais, uma rota a mais, um produto e um componente a mais. Para a instância 16A, apenas com veículos leves a instância foi infactível.

As rotas desta instância estão apresentadas na figura 33, observamos pela figura que na instância 16B temos 5 rotas, na instância 16C temos duas rotas e na instância 16D temos 5 rotas. As rotas das instâncias 16B e 16D são iguais. Na instância 16C temos duas rotas, diferente da 15C que temos 4 rotas, esta diferença decorre principalmente pelo aumento na quantidade de períodos e do prazo de entrega, onde, agora podem ser utilizados menos veículos em rotas maiores de modo a atender o prazo do cliente.

Na figura 34 temos o detalhamento da sequência das rotas e os veículos utilizados em cada rota na instância 16D. Vemos pela figura que tanto na instância 16B como 16D não foram utilizados todos veículos no primeiro período de rotas. Nesta figura, 0 e 7 são o depósito

Figura 33 – Mapas das rotas das instâncias 16B, 16C e 16D



Fonte: Autoria própria.

Figura 34 – Rotas e veículos utilizados em cada rota para as instâncias 16B, 16C e 16D

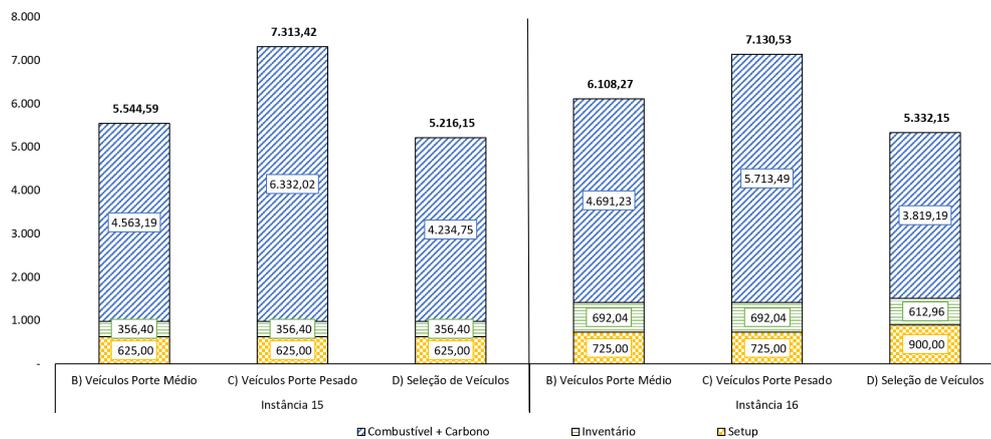
	Rota 1 Veículo 1	Rota 1 Veículo 2	Rota 2 Veículo 1	Rota 2 Veículo 2	Rota 2 Veículo 3	Rota 3 Veículo 1
16B) Roteamento	0 → 5 → 7	0 → 3 → 7	0 → 4 → 7	0 → 6 → 2 → 7	-	0 → 1 → 7
Porte Veículo	Médio	Médio	Médio	Médio		Médio
16C) Roteamento	0 → 6 → 1 → 4 → 5 → 7	0 → 2 → 3 → 7			-	
Porte Veículo	Pesado	Pesado				
16D) Roteamento	0 → 5 → 7	0 → 3 → 7	0 → 4 → 7	0 → 6 → 2 → 7	-	0 → 1 → 7
Porte Veículo	Leve	Médio	Leve	Médio		Leve

Fonte: Autoria própria.

Na figura 35 e na tabela 42 temos adicionados os custos do conjunto de instâncias 16. Quando analisamos os custos, vemos que o peso do veículo se mantém como o maior componente do gasto de combustível e emissão de carbono, onde o porte pesado possui o maior valor. Vemos também que o motor do veículo possui menor valor no porte pesado.

Observamos que quando comparamos as instâncias 15C e 16C os custos de roteamento decrescem de 6.332,02 para 5.713,49 (9,77%), mesmo com o acréscimo de um cliente e da demanda de um novo produto nos clientes, isso ocorre devido ao aumento de um período que permite a consolidação de mais clientes dentro de uma rota.

Figura 35 – Custos de combustível e carbono para as instâncias 16B, 16C e 16D



Fonte: Autoria própria.

Tabela 42 – Custos de roteamento de veículos para instâncias 16A, 16B, 16C e 16D

Custos	A) Porte Leve	B) Porte Médio	C) Porte Pesado	D) Um de cada
Combustível + Carbono	-	4.691,23	5.713,49	3.819,19
Combustível	-	4.458,49	5.430,04	3.629,72
Motor do Veículo	-	473,84	196,33	427,31
Peso do Veículo	-	2.618,33	3.522,3	1.951,18
Carga	-	769,93	1.025,3	769,93
Resistência ao Ar	-	596,4	686,11	481,3
Carbono	-	232,73	283,45	189,47
Motor do Veículo	-	24,73	10,25	22,31
Peso do Veículo	-	136,68	183,86	101,85
Carga	-	40,19	53,52	40,19
Resistência ao Ar	-	31,13	35,81	25,12
Distância	-	4.676	3.089	4.064
Kg de Carbono	-	-	-	-

O tempo computacional para encontrar as soluções do experimento 6 estão na tabela 43.

Tabela 43 – Tempo computacional para encontrar soluções do experimento 6

Instância	Tempo Computacional (Segundos)
15B	8,19
15C	21,36
15D	1,80
16B	5.480,03
16C	249,91
16D	179,45

6 CONCLUSÕES E PESQUISAS FUTURAS

6.1 Conclusões

Na presente dissertação é proposta a extensão do modelo de Miranda et al. (2019), modelo de integrado de planejamento da produção e roteamento de veículos em uma indústria de móveis para considerar a minimização da emissão de CO_2 via minimização de custos de emissão e, ainda, a inclusão da frota heterogênea em relação a emissão para essa extensão. O objetivo é avaliar o quanto as emissões de CO_2 podem influenciar nas decisões de programação da produção e roteamento de veículos. A extensão inclui termos relacionados a carga carregada nos veículos, velocidade, peso dos veículos e distância percorrida.

Foram realizados experimentos computacionais para testar a extensão do modelo agora denominado CarbonLSMVRP. As instâncias são baseados na literatura científica relacionada que utilizam valores realistas. Dos experimentos computacionais realizados, podemos observar que:

- Experimentos 1 e 2: comprovam que considerar a carga como variável impacta na decisão de rota e reduz o consumo de combustível, exemplificando que nem sempre a rota com menor distância é a rota com menos gasto de combustível. Na instância 1, por exemplo, vemos a redução de 0,84% do custo do roteamento, já na instância 4 (considerando pesos reais), além da mudança na decisão da rota devido a consideração da carga, obtivemos a redução de 4,66% nos custos de roteamento.
- Experimentos 3 e 4: além de impactar na otimização do consumo de combustível a velocidade é essencial para flexibilizar as janelas de tempo e permitir que se tenha a minimização de custos com velocidades diferentes em arcos diferentes. Vemos no conjunto de instâncias 7, que a velocidade impacta proporcionalmente no custo proveniente da resistência do ar, mas é inversamente proporcional ao custo que vem do motor do veículo. No conjunto de instância 10, vemos que ao mesmo tempo que considerar a seleção das velocidades factibiliza o modelo, podemos ter a redução de 10,7% nos custos totais de roteamento.
- Experimento 5: avaliam o impacto da adição de custos de carbono no *trade off* entre produção e roteamento de veículos. É visto que em um caso onde os custos de produção são altos e o combustível não, as decisões são puxadas pela produção, porém, ao se considerar o custo de carbono alto as decisões são determinadas pelo

roteamento de veículos, comprovando que pode haver o *trade off* ao se considerar custos de carbono.

Para refletir a realidade e necessidade de várias empresas foi desenvolvido um modelo adicional HeF-CarbonLSMVRP que considera frota heterogênea de veículos. A diferença entre os veículos é dada não apenas em termos de capacidade de carga mas também em termos de tecnologia de motor que possuem diferentes taxas de emissão de carbono. O experimento 6 avaliou o impacto da frota heterogênea na resolução das instâncias.

- Experimento 6: este experimento indica que para organizações com frota heterogênea, considerar este aspecto no planejamento da produção e no roteamento de veículos possibilita a redução de custo, permitindo a seleção do melhor tipo de veículo para cada rota. Foi observado que ocorreram alterações nas decisões de roteamento ao se considerar veículos de diferentes portes. Outro ponto importante é que considerar veículos diferentes pode factibilizar a solução do modelo, visto que nos experimentos utilizar apenas veículos de porte leve era inactível, mas quando se tinha a opção de escolha, era possível utilizar em rotas que esses veículos consumiam menos combustível e emitiam menos CO_2 .

6.2 Pesquisas Futuras

Esta dissertação teve também o propósito exploratório de entender quais os impactos da consideração da emissão de CO_2 dentro de um modelo de planejamento da produção e roteamento de veículos. A partir deste caráter exploratório foram notadas pesquisas futuras a partir do estudo realizado.

Em relação a possíveis modificações no modelo, temos alguns elementos que podem ser adicionados, constatados na revisão bibliográfica:

- Considerar uma frota híbrida que utilize veículos elétricos. Este ponto deve ser avaliado considerando a capacidade de veículos elétricos realizarem rotas longas e sua necessidade de reabastecimento;
- Considerar no modelo os tempos de congestionamento que há no transito. Este ponto pode ser importante para trechos dentro das cidades ou em pontos de rodovia que recorrentemente possuam alto tráfego de veículos;
- Considerar no modelo limites de velocidade que cada rodovia possui;
- Adicionar uma penalidade por atraso na função objetivo;

- Considerar entregas fracionadas, em cenários que o cliente goste de receber as cargas fracionadas.
- Considerar a emissão de carbono proveniente da produção.

Vale ressaltar que essas mudanças trazem complexidade ao modelo, o que implica em longos tempos de resolução (diversos dias) para encontrar soluções ótimas em instâncias de tamanho maior. Como o presente modelo já apresenta alta complexidade, uma forma de encontrar soluções é através de métodos heurísticos e meta-heurísticos, que poderiam ser explorados. Uma forma também de alterar o modelo é a utilização de funções multi-objetivo, que podem ser exploradas para facilitar o tempo de solução.

Então as organizações ao se preocuparem com as questões de emissão de CO_2 , tanto pelo aspecto financeiro como ambiental, precisam considerar no planejamento da produção e definição do roteamento de veículos essas emissões.

Referências

- ADULYASAK, Y.; CORDEAU, J. F.; JANS, R. The production routing problem: A review of formulations and solution algorithms. *Computers and Operations Research*, Elsevier, v. 55, p. 141–152, 2015. ISSN 03050548. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2014.01.011>.
- AL-GHUSSAIN, L. Global warming: review on driving forces and mitigation. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, v. 38, n. 1, p. 13–21, 2019. ISSN 19447450.
- ALP, O.; TAN, T.; UDENIO, M. Transitioning to sustainable freight transportation by integrating fleet replacement and charging infrastructure decisions. *Omega (United Kingdom)*, Elsevier Ltd, v. 109, p. 102595, 2022. ISSN 03050483. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102595>.
- ANDRADE, J. C. S.; COSTA, P. Mudança climática, protocolo de kyoto e mercado de créditos de carbono: desafios à governança ambiental global. *Organizações & Sociedade, SciELO Brasil*, v. 15, n. 45, p. 29–45, 2008.
- BABAGOLZADEH, M.; SHRESTHA, A.; ABBASI, B.; ZHANG, Y.; WOODHEAD, A.; ZHANG, A. Sustainable cold supply chain management under demand uncertainty and carbon tax regulation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Elsevier, v. 80, n. February, p. 102245, 2020. ISSN 13619209. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102245>.
- BALAMURUGAN, T.; KARUNAMOORTHY, L.; ARUNKUMAR, N.; SANTHOSH, D. Optimization of inventory routing problem to minimize carbon dioxide emission. *International Journal of Simulation Modelling*, v. 17, n. 1, p. 42–54, 2018. ISSN 17264529.
- BALDO, T. A.; SANTOS, M. O.; ALMADA-LOBO, B.; MORABITO, R. An optimization approach for the lot sizing and scheduling problem in the brewery industry. *Computers and Industrial Engineering*, Elsevier Ltd, v. 72, n. 1, p. 58–71, 2014. ISSN 03608352. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2014.02.008>.
- BARTH, M.; YOUNGLOVE, T.; SCORA, G. Development of a heavy-duty diesel modal emissions fuel consumption model. *Technical report, UC Berkeley: California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH)*, v. 55, n. 10, p. 1431–1440, 2005. ISSN 21622906.
- BEKTAŞ, T.; LAPORTE, G. The Pollution-Routing Problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 45, n. 8, p. 1232–1250, 2011. ISSN 01912615.
- BENT RUSSELL W. VAN HENTENRYCK, P. Scenario-based planning for partially dynamic vehicle routing with stochastic customers. *Operations Research*, v. 52, n. 6, p. 977–987, 2004. ISSN 0030364X.
- CASTKA, P.; BALZAROVA, M. A. The impact of ISO 9000 and ISO 14000 on standardisation of social responsibility-an inside perspective. *International Journal of Production Economics*, v. 113, n. 1, p. 74–87, 2008. ISSN 09255273.

- CHEN, J.; GUI, P.; DING, T.; NA, S.; ZHOU, Y. Optimization of transportation routing problem for fresh food by improved ant colony algorithm based on tabu search. *Sustainability (Switzerland)*, v. 11, n. 23, p. 1–22, 2019. ISSN 20711050.
- DEMIR, E.; BEKTAŞ, T.; LAPORTE, G. An adaptive large neighborhood search heuristic for the Pollution-Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, v. 223, n. 2, p. 346–359, 2012. ISSN 03772217.
- DU, M.; KONG, N.; HU, X. A new heuristic scheduling method for the make-pack-route problem in make-to-order supply chains. *Infor*, v. 57, n. 2, p. 296–313, 2019. ISSN 19160615.
- DUKKANCI, O.; KARA, B. Y.; BEKTAŞ, T. The green location-routing problem. *Computers and Operations Research*, v. 105, p. 187–202, 2019. ISSN 03050548.
- FAGAN, M. L. A Guide to Global Sourcing. *Journal of Business Strategy*, v. 12, n. 2, p. 21–25, 1991. ISSN 02756668.
- FERREIRA, K. M.; QUEIROZ, T. A. de; TOLEDO, F. M. B. An exact approach for the green vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints and split delivery. *Computers and Operations Research*, Elsevier Ltd, v. 136, n. July, p. 105452, 2021. ISSN 03050548. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105452>.
- FLYNN, B. B.; HUO, B.; ZHAO, X. The impact of supply chain integration on performance: A contingency and configuration approach. *Journal of Operations Management*, v. 28, n. 1, p. 58–71, 2010. ISSN 02726963.
- FRANCESCHETTI, A.; HONHON, D.; Van Woensel, T.; BEKTAŞ, T.; LAPORTE, G. The time-dependent pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 56, p. 265–293, 2013. ISSN 01912615.
- FRIEDLINGSTEIN, P.; O’SULLIVAN, M.; JONES, M. W. Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data*, v. 14, n. 11, p. 4811–4900, 2023. ISSN 18663516. Disponível em: <http://www.nasa.gov/press-release/nasa-says-2022-fifth-warmest-year-on-record-warming-trend-continues>.
- GIL, A. C. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. [S.l.]: 6. ed. Editora Atlas SA, 2008.
- HANDL, G.; DEUTSCH, E.; LAW, I. Historical Archives - Introductory Note - Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment (Stockholm Declaration), 1972 and the Rio Declaration on Environment and Development, 1992 - English. p. 1–11, 2012.
- HOFF, A.; ANDERSSON, H.; CHRISTIANSEN, M.; HASLE, G.; LØKKETANGEN, A. Industrial aspects and literature survey: Fleet composition and routing. *Computers and Operations Research*, Elsevier, v. 37, n. 12, p. 2041–2061, 2010. ISSN 03050548. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2010.03.015>.
- HOUGHTON, J. Global warming. *Reports on Progress in Physics*, IOP Publishing, v. 68, n. 6, p. 1343–1403, may 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/6/r02>.

- ISLAM, M. A.; GAJPAL, Y.; ELMEKKAWY, T. Y. Mixed fleet based green clustered logistics problem under carbon emission cap. *Sustainable Cities and Society*, Elsevier Ltd, v. 72, n. January, p. 103074, 2021. ISSN 22106707. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103074>.
- JACOBSON, L. S. V.; OLIVEIRA, B. F. A.; PEREZ, L. P.; HACON, S. S. Impact of global warming on potential years of life lost by cardiopulmonary diseases in brazilian capital cities. *Sustentabilidade em Debate*, v. 11, n. 3, p. 331–345, 2020. ISSN 21799067.
- JACOBSON, T. A.; KLER, J. S.; HERNKE, M. T.; BRAUN, R. K.; MEYER, K. C.; FUNK, W. E. Direct human health risks of increased atmospheric carbon dioxide. *Nature Sustainability*, Springer US, v. 2, n. 8, p. 691–701, 2019. ISSN 23989629. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41893-019-0323-1>.
- JIA, Y.; ZENG, W.; XING, Y.; YANG, D.; LI, J. The bike-sharing rebalancing problem considering multi-energy mixed fleets and traffic restrictions. *Sustainability (Switzerland)*, v. 13, n. 1, p. 1–15, 2021. ISSN 20711050.
- KABADURMUS, O.; ERDOGAN, M. S. A green vehicle routing problem with multi-depot, multi-tour, heterogeneous fleet and split deliveries: a mathematical model and heuristic approach. *Journal of Combinatorial Optimization*, Springer US, v. 45, n. 3, p. 1–29, 2023. ISSN 15732886. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10878-023-01016-7>.
- KAMPA, M.; CASTANAS, E. Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*, v. 151, n. 2, p. 362–367, 2008. ISSN 02697491.
- KANG, H. Y.; LEE, A. H.; YEH, Y. F. An optimization approach for traveling purchaser problem with environmental impact of transportation cost. *Kybernetes*, v. 50, n. 8, p. 2289–2317, 2021. ISSN 0368492X.
- KARIMI B. FATEMI GHOMI, S. M.; WILSON, J. M. The capacitated lot sizing problem: A review of models and algorithms. *Omega*, v. 31, n. 5, p. 365–378, 2003. ISSN 03050483.
- KEEBLE, B. R. The Brundtland Report: 'Our Common Future'. *Medicine and War*, v. 4, n. 1, p. 17–25, 1988. ISSN 07488009.
- KOÇ, Ç.; BEKTAŞ, T.; JABALI, O.; LAPORTE, G. The fleet size and mix pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 70, p. 239–254, 2014. ISSN 01912615.
- KUMAR, M.; KUMAR, D.; SAINI, P.; PRATAP, S. Inventory routing model for perishable products toward circular economy. *Computers and Industrial Engineering*, Elsevier Ltd, v. 169, n. February, p. 108220, 2022. ISSN 03608352. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108220>.
- KUVVETLI, Y.; EROL, R. Coordination of production planning and distribution in closed-loop supply chains. *Neural Computing and Applications*, v. 32, n. 17, p. 13605–13623, 2020. ISSN 14333058.
- KUYPER, J.; SCHROEDER, H.; LINNÉR, B.-O. The UNFCCC. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 43, n. August, p. 15.1–15.26, 2018.

- LAPORTE, G. The traveling salesman problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, v. 59, n. 2, p. 231–247, 1992. ISSN 03772217.
- LEE, A. H.; KANG, H. Y.; YE, S. J.; WU, W. Y. An integrated approach for sustainable supply chain management with replenishment, transportation, and production decisions. *Sustainability (Switzerland)*, v. 10, n. 11, p. 1–21, 2018. ISSN 20711050.
- LEITE, V. P.; DEBONE, D.; MIRAGLIA, S. G. E. K. *Emissões de gases de efeito estufa no estado de São Paulo: análise do setor de transportes e impactos na saúde*. 2020. 143–153 p.
- LI, J.; WANG, D.; ZHANG, J. Heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem based on fuel and carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*, v. 201, p. 896–908, 2018. ISSN 09596526.
- LI, L.; YANG, Y.; QIN, G. Optimization of integrated inventory routing problem for cold chain logistics considering carbon footprint and carbon regulations. *Sustainability (Switzerland)*, v. 11, n. 17, 2019. ISSN 20711050.
- LIAO, T. Y. On-Line Vehicle Routing Problems for Carbon Emissions Reduction. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, v. 32, n. 12, p. 1047–1063, 2017. ISSN 14678667.
- LIAO, W.; LIU, L.; FU, J. A comparative study on the routing problem of electric and fuel vehicles considering carbon trading. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 16, n. 17, 2019. ISSN 16604601.
- LIU, C.; KOU, G.; ZHOU, X.; PENG, Y.; SHENG, H.; ALSAADI, F. E. Time-dependent vehicle routing problem with time windows of city logistics with a congestion avoidance approach. *Knowledge-Based Systems*, Elsevier B.V., v. 188, n. xxxx, p. 104813, 2020. ISSN 09507051. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2019.06.021>.
- LIU, G.; HU, J.; YANG, Y.; XIA, S.; LIM, M. K. Vehicle routing problem in cold Chain logistics: A joint distribution model with carbon trading mechanisms. *Resources, Conservation and Recycling*, Elsevier, v. 156, n. September 2019, p. 104715, 2020. ISSN 18790658. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104715>.
- LIU, W. Y.; LIN, C. C.; CHIU, C. R.; TSAO, Y. S.; WANG, Q. Minimizing the carbon footprint for the time-dependent heterogeneous-fleet vehicle routing problem with alternative paths. *Sustainability (Switzerland)*, v. 6, n. 7, p. 4658–4684, 2014. ISSN 20711050.
- LIU, Z.; CHEN, Y.; QIN, J. The pollution-routing problem with one general period of congestion. *Journal of Modelling in Management*, 2022. ISSN 17465672.
- LUO, H.; DRIDI, M.; GRUNDER, O. An ACO-based heuristic approach for a route and speed optimization problem in home health care with synchronized visits and carbon emissions. *Soft Computing*, Springer Berlin Heidelberg, v. 25, n. 23, p. 14673–14696, 2021. ISSN 14337479. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00500-021-06263-6>.
- MAJIDI, S.; HOSSEINI-MOTLAGH, S. M.; IGNATIUS, J. Adaptive large neighborhood search heuristic for pollution-routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Soft Computing*, Springer Berlin Heidelberg, v. 22, n. 9, p. 2851–2865, 2018. ISSN 14337479.

- MICHAELOWA, A.; SHISHLOV, I.; BRESCIA, D. Evolution of international carbon markets: lessons for the Paris Agreement. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, v. 10, n. 6, p. 1–24, 2019. ISSN 17577799.
- MICHELI, G. J.; MANTELLA, F. Modelling an environmentally-extended inventory routing problem with demand uncertainty and a heterogeneous fleet under carbon control policies. *International Journal of Production Economics*, Elsevier B.V., v. 204, n. August, p. 316–327, 2018. ISSN 09255273. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.018>.
- MIRANDA, P. L.; MORABITO, R.; FERREIRA, D. Optimization model for a production, inventory, distribution and routing problem in small furniture companies. *Top*, Springer Berlin Heidelberg, v. 26, n. 1, p. 30–67, 2018. ISSN 18638279.
- MIRANDA, P. L.; MORABITO, R.; FERREIRA, D. Mixed integer formulations for a coupled lot-scheduling and vehicle routing problem in furniture settings. *Infor*, Taylor & Francis, v. 57, n. 4, p. 563–596, 2019. ISSN 19160615. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03155986.2019.1575686>.
- MOGALE, D. G.; DE, A.; GHADGE, A.; TIWARI, M. K. Designing a sustainable freight transportation network with cross-docks. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 61, n. 5, p. 1455–1478, 2023. ISSN 1366588X. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2037777>.
- MORABITO R.; PUREZA, V. Modelagem e simulação. In: *MIGUEL. P.A.C. (Ed.). Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. [S.l.]: Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. cap. 8, p. 165–194.
- NEVES-MOREIRA, F.; ALMADA-LOBO, B.; CORDEAU, J. F.; GUIMARÃES, L.; JANS, R. Solving a large multi-product production-routing problem with delivery time windows. *Omega (United Kingdom)*, v. 86, p. 154–172, 2019. ISSN 03050483.
- NOVAES, W. Eco-92: avanços e interrogações. *Estudos Avançados*, v. 6, n. 15, p. 79–93, 1992.
- NUORTIO, T.; KYTÖJOKI, J.; NISKA, H.; BRÄYSY, O. Improved route planning and scheduling of waste collection and transport. *Expert Systems with Applications*, v. 30, n. 2, p. 223–232, 2006. ISSN 09574174.
- PANDEY, D.; AGRAWAL, M.; PANDEY, J. S. Carbon footprint: Current methods of estimation. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 178, n. 1-4, p. 135–160, 2011. ISSN 01676369.
- PETERS, R. L. Effects of global warming on forests. *Forest Ecology and Management*, v. 35, n. 1-2, p. 13–33, 1990. ISSN 03781127.
- PISINGER, D.; ROPKE, S. A general heuristic for vehicle routing problems. *Computers and Operations Research*, v. 34, n. 8, p. 2403–2435, 2007. ISSN 03050548.
- POCHET, Y.; WOLSEY, L. A. *Production planning by mixed integer programming*. [S.l.: s.n.], 2006. 1–499 p. ISSN 21971773. ISBN 9780387299594.
- PORTER, M. E. Location , Competition , and Economic Development : Local Clusters in a Global. *Economic development quarterly*, v. 14, n. 1, p. 15–34, 2000.

POYER, F. R.; SILVEIRA, C. S.; COSTA, C. L.; OLIVEIRA, L. Crédito de carbono: panorama das publicações no Brasil para os últimos dez anos (2009 a 2019). *Anais..[do] VIII Simpósio da Ciência do Agronegócio*, 2020.

QIAO, Q.; TAO, F.; WU, H.; YU, X.; ZHANG, M. Optimization of a capacitated vehicle routing problem for sustainable municipal solid waste collection management using the PSO-TS algorithm. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 6, 2020. ISSN 16604601.

QIN, G.; TAO, F.; LI, L. A vehicle routing optimization problem for cold chain logistics considering customer satisfaction and carbon emissions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 16, n. 4, 2019. ISSN 16604601.

QIU, R.; XU, J.; KE, R.; ZENG, Z.; WANG, Y. Carbon pricing initiatives-based bi-level pollution routing problem. *European Journal of Operational Research*, Elsevier B.V., v. 286, n. 1, p. 203–217, 2020. ISSN 03772217. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.03.012>.

QIU, Y.; QIAO, J.; PARDALOS, P. M. A branch-and-price algorithm for production routing problems with carbon cap-and-trade. *Omega (United Kingdom)*, Elsevier, v. 68, p. 49–61, 2017. ISSN 03050483. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2016.06.001>.

QIU, Y.; WANG, L.; XU, X.; FANG, X.; PARDALOS, P. M. Formulations and branch-and-cut algorithms for multi-product multi-vehicle production routing problems with startup cost. *Expert Systems with Applications*, Elsevier Ltd, v. 98, p. 1–10, 2018. ISSN 09574174. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.01.006>.

QUAN, X.; PANG, Y.; CHEN, J.; CHU, X.; SHANGGUAN, L. Open pollution routing problem of logistics distribution in medical union based on differential search algorithm. *Scientific Reports*, Nature Publishing Group UK, v. 12, n. 1, p. 1–12, 2022. ISSN 20452322. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23387-3>.

REILLY, J.; PRINN, R.; HARNISCH, J.; FITZMAURICE, J.; JACOBY, H.; KICKLIGHTER, D.; MELILLO, J.; STONE, P.; SOKOLOV, A.; WANG, C. Multi-gas assessment of the Kyoto protocol. *Nature*, v. 401, n. 6753, p. 549–555, 1999. ISSN 00280836.

REN, T.; LUO, T.; JIA, B.; YANG, B.; WANG, L.; XING, L. Improved ant colony optimization for the vehicle routing problem with split pickup and split delivery. *Swarm and Evolutionary Computation*, Elsevier B.V., v. 77, n. January, 2023. ISSN 22106502.

SARBIJAN, M. S.; BEHNAMIAN, J. Multi-product production routing problem by consideration of outsourcing and carbon emissions: particle swarm optimization. *Engineering Optimization*, Taylor & Francis, p. 1–17, 2020. ISSN 10290273. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/0305215X.2020.1786080>.

SCHLEUSSNER, C. F.; ROGELJ, J.; SCHAEFFER, M.; LISSNER, T.; LICKER, R.; FISCHER, E. M.; KNUTTI, R.; LEVERMANN, A.; FRIELER, K.; HARE, W. Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. *Nature Climate Change*, Nature Publishing Group, v. 6, n. 9, p. 827–835, 2016. ISSN 17586798. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate3096>.

- SEURING, S.; MÜLLER, M. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, v. 16, n. 15, p. 1699–1710, 2008. ISSN 09596526.
- SOARES, T. C.; CUNHA, D. A. da. Emissões de gases de efeito estufa e eficiência ambiental no Brasil. *Nova Economia*, v. 29, n. 2, p. 429–458, 2019. ISSN 0103-6351.
- SOLOMON, M. M. Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems With Time Window Constraints. *Operations Research*, v. 35, n. 2, p. 254–265, 1987. ISSN 0030364X.
- SOYSAL, M.; ÇIMEN, M.; DEMIR, E. On the mathematical modeling of green one-to-one pickup and delivery problem with road segmentation. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, v. 174, p. 1664–1678, 2018. ISSN 09596526.
- SPRINGER, U. The market for tradable GHG permits under the Kyoto Protocol: A survey of model studies. *Energy Economics*, v. 25, n. 5, p. 527–551, 2003. ISSN 01409883.
- STARIK, M. The Toronto conference: Reflections on stakeholder theory. *Business & Society*, v. 33, n. 1, p. 89–95, 1994.
- SUN, H.; SUN, S.; ZHOU, Y.; XUE, Y. Trade-offs between economic and environmental goals of production-inventory-routing problem for multiple perishable products. *Computers and Industrial Engineering*, Elsevier Ltd, v. 178, n. 3663, p. 109133, 2023. ISSN 03608352. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109133>.
- TAJIK, N.; TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R.; VAHDANI, B.; Meysam Mousavi, S. A robust optimization approach for pollution routing problem with pickup and delivery under uncertainty. *Journal of Manufacturing Systems*, The Society of Manufacturing Engineers, v. 33, n. 2, p. 277–286, 2014. ISSN 02786125. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.12.009>.
- TAN, Y.; DENG, L.; LI, L.; YUAN, F. The capacitated pollution routing problem with pickup and delivery in the last mile. *Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics*, v. 31, n. 4, p. 1193–1215, 2019. ISSN 17584248.
- TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review* Introduction: the need for an evidence- informed approach. *British Journal of Management*, v. 14, p. 207–222, 2003.
- TUCKER, M. Carbon dioxide emissions and global GDP. *Ecological Economics*, v. 15, n. 3, p. 215–223, 1995. ISSN 09218009.
- WANG, Z.; WEN, P. Optimization of a low-carbon two-echelon heterogeneous-fleet vehicle routing for cold chain logistics under mixed time window. *Sustainability (Switzerland)*, v. 12, n. 5, 2020. ISSN 20711050.
- WARD, P. L. Sulfur dioxide initiates global climate change in four ways. *Thin Solid Films*, Elsevier B.V., v. 517, n. 11, p. 3188–3203, 2009. ISSN 00406090. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2009.01.005>.

- WU, D.; CUI, J.; LI, D.; MANSOUR, R. F. A New Route Optimization Approach of Fresh Agricultural Logistics Distribution. *Intelligent Automation and Soft Computing*, v. 34, n. 3, p. 1553–1569, 2022. ISSN 2326005X.
- WU, D.; WU, C. Tdgvprstw of fresh agricultural products distribution: Considering both economic cost and environmental cost. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 11, n. 22, 2021. ISSN 20763417.
- XIAO, Y.; ZHAO, Q.; KAKU, I.; XU, Y. Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem. *Computers and Operations Research*, Elsevier, v. 39, n. 7, p. 1419–1431, 2012. ISSN 03050548. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2011.08.013>.
- YAO, Q.; ZHU, S.; LI, Y. Green Vehicle-Routing Problem of Fresh Agricultural Products Considering Carbon Emission. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 19, n. 14, 2022. ISSN 16604601.
- YAO, Z.; CAO, H.; CUI, Z.; WANG, Y.; HUANG, N. Research on Urban Distribution Routes Considering the Impact of Vehicle Speed on Carbon Emissions. *Sustainability (Switzerland)*, v. 14, n. 23, 2022. ISSN 20711050.
- YAVUZ, M.; ÇAPAR, I. Alternative-fuel vehicle adoption in service fleets: Impact evaluation through optimization modeling. *Transportation Science*, v. 51, n. 2, p. 480–493, 2017. ISSN 15265447.
- ZHANG, D.; HE, R.; LI, S.; WANG, Z. A multimodal logistics service network design with time windows and environmental concerns. *PLoS ONE*, v. 12, n. 9, p. 1–19, 2017. ISSN 19326203.
- ZHANG, S.; ZHOU, Z.; LUO, R.; ZHAO, R.; XIAO, Y.; XU, Y. A low-carbon, fixed-tour scheduling problem with time windows in a time-dependent traffic environment. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 61, n. 18, p. 6177–6196, 2022. ISSN 1366588X. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2153940>.
- ZHENG, X.; QIN, S.; ZHANG, Y. Design an Effective Blood Distribution Network with Minimal Impacts on the Environment and Blood Supply Assurance. *Journal of Environmental and Public Health*, v. 2022, 2022. ISSN 16879813.
- ZHOU, Y.; LIU, C.; XU, Q. Time-Dependent Green Location-Routing Problem under Carbon Cap-and-Trade Policy. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2677, n. 5, p. 1135–1150, 2022. ISSN 0361-1981.
- ZHU, S.; FU, H.; LI, Y. Optimization research on vehicle routing for fresh agricultural products based on the investment of freshness-keeping cost in the distribution process. *Sustainability (Switzerland)*, v. 13, n. 14, 2021. ISSN 20711050.

APÊNDICE A – Contextualização sobre Impactos da Emissão de Carbono

Nesse apêndice são abordados os impactos da emissão dos gases do efeito estufa, relacionando legislações que regulamentam essa emissão ao histórico global de como essas emissões são tratadas. Por fim, são abordados os mecanismos que visam incentivar a redução dessas emissões. Estes temas são tratados com objetivo de apontar a importância da redução da emissão dos gases GEE e demonstrar que cada vez mais ter medidas que reduzam essas emissões é necessário nas organizações.

A.1 Efeito Estufa e Aquecimento Global

Uma das principais pautas e discussões dentro do aspecto ambiental é a existência do efeito estufa e suas causas no meio ambiente. Este efeito, que é um processo natural que ocorre na atmosfera terrestre, decorre da absorção de radiação solar por gases presentes nela, de modo que regulam temperatura ao reter essa radiação na atmosfera e evitam que ela seja refletida ao espaço. No entanto, quando há uma perturbação no equilíbrio desses gases na atmosfera por emissões excessivas, surge o aquecimento global, isto é, um excesso na retenção de radiação na atmosfera terrestre, devido a quantidade excessiva de gases do efeito estufa que são emitidos (AL-GHUSSAIN, 2019).

Os principais gases relacionados ao efeito estufa são o gás dióxido de carbono CO_2 com 81% das emissões, o metano CH_4 com 10% e o óxido nitroso NO_2 com 7%, (LEITE; DEBONE; MIRAGLIA, 2020).

Essas emissões excessivas são provenientes de atividades como: a queima de combustíveis fósseis (como o carvão e a gasolina), pela mudança do uso da terra (devido a queimadas ou desmatamento) e atividades da agropecuária. Vale ressaltar que essas atividades, como a queima de combustíveis, também aumenta a emissão de outros poluentes atmosféricos como o monóxido de carbono CO e os óxidos de enxofre SO_x , que também tem impactos negativos no ambiente (TUCKER, 1995; WARD, 2009).

Diversos estudos analisam o impacto da emissão excessiva desses gases na atmosfera e nos biomas relacionados (SOARES; CUNHA, 2019; JACOBSON et al., 2020; LEITE; DEBONE; MIRAGLIA, 2020). Alguns dos principais impactos são:

- Aumento excessivo da temperatura global;
- Maior incidência de eventos extremos, como onda de calor, incêndios, furacões;

- Aumento na incidência de doenças cardíacas e respiratórias;
- Impacto na vida marinha devido a variação na acidez dos oceanos;

Em um relatório emitido pelo Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) no ano de 2021 o Brasil teve como emissão 1,4 bilhão de toneladas de CO_2 emitido, sendo a atividade industrial representante de 77,8 milhões de toneladas, cerca de 5,5% do total. Na figura 36 é apresentado a evolução das emissões de carbono no Brasil por setor: Resíduos, Processos Industriais, Energia, Agropecuária e Mudança do Uso da Terra e Florestas.

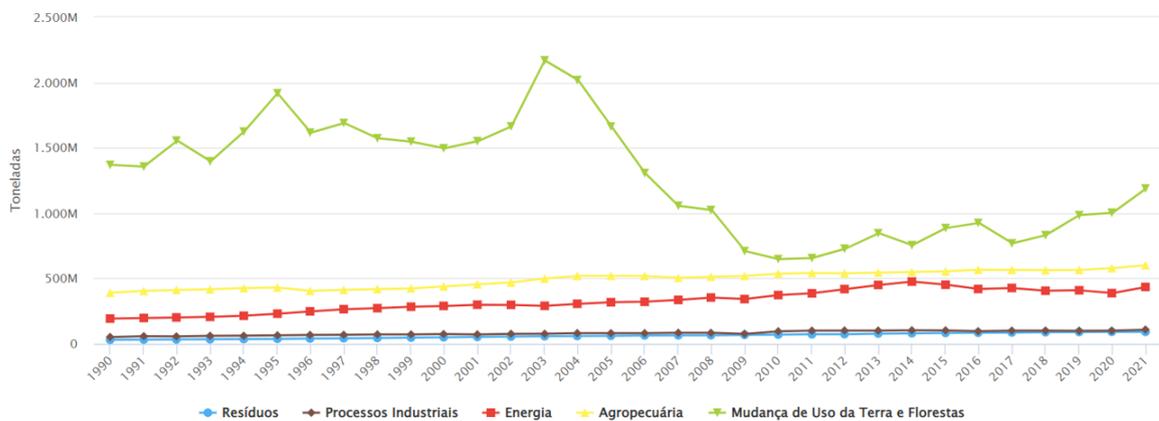


Figura 36 – Emissão de Carbono por setor de 1990 até 2021 no Brasil (SEEG)

Fonte: SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa)

A.2 Legislações e Tratados Internacionais

É visto na história que a importância da redução das emissões dos gases estufa vem sendo discutido cada vez mais e isso se traduz em acordos globais. Abaixo é apresentado um histórico dos principais marcos globais que tratam de regulamentar e definir planos para redução das emissões de carbono.

- 1972 - Realizada a 1ª Conferência Mundial sobre Meio Ambiente Humano organizada pela ONU, Conferência de Estocolmo (STARIK, 1994).
- 1987 - Lançado pela ONU o relatório “Nosso Futuro Comum” que estabeleceu o conceito de desenvolvimento sustentável e reconheceu o tema mudanças climáticas como prioritário (KEEBLE, 1988).
- 1988 - Realizada a Conferência Mundial sobre as Mudanças da Atmosfera em Toronto no Canadá, na qual foi criado o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (HANDL; DEUTSCH; LAW, 2012).

- 1992 - Ocorreu a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (ECO 1992) no Rio de Janeiro, Brasil. Na ECO-92 a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (UNFCCC, sigla em inglês) foi assinada e foi um importante marco na política ambiental internacional. Este momento foi culminante da trajetória de construção do desenvolvimento sustentável, por meio de uma coalizão geopolítica e do fortalecimento da atuação de representantes da sociedade civil, com a efetiva participação de organizações não governamentais (ONGs) e dos movimentos sociais e populares (NOVAES, 1992).
- 1995 - Iniciadas as Conferências das Partes na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (COP), realizadas anualmente (KUYPER; SCHROEDER; LINNÉR, 2018).
- 1997 - Ocorreu a COP-3 em Quioto no Japão onde foi adotado o Protocolo de Quioto, este foi o primeiro tratado internacional para controle da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera. Estabeleceu metas de redução para GEE para os países desenvolvidos, chamados “Países do Anexo I”. Foi extremamente importante para o desenvolvimento do mercado de carbono, pois estabeleceu a possibilidade de serem gerados créditos de carbono através de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo e da Implementação Conjunta (REILLY et al., 1999).
- 2015 - Ocorre a COP-21, Paris na França, que culminou com a formalização do Acordo de Paris. Este acordo foi baseado nas proposições de cada país através das Contribuições Pretendidas Nacionalmente Determinadas (INDC), as quais deveriam ser posteriormente ratificadas, passando a Contribuições Nacionalmente Determinadas, NDCs. Até abril de 2019, 195 partes já haviam assinado o Acordo de Paris. Destas, 96 mencionaram a precificação de carbono em suas NDCs. Este fato demonstra a grande importância dada à precificação de carbono para se alcançar a redução de emissões no mundo. Apesar de o avanço ter sido tímido no passado recente, esse pode se tornar um dos principais instrumentos no futuro. Logo após foram definidas as Contribuições Nacionalmente Definidas, onde com base no Acordo de Paris o Brasil se propõe com metas definidas a redução da emissão de carbono, de 37% de redução até 2025 e de 43% de redução até 2030 (SCHLEUSSNER et al., 2016).
- 2022 - Realizada a COP-27 em Sharm El Sheik no Egito, com diversas discussões sobre o Global Carbon Budget. Na conferência novamente foram avaliadas regras para a comercialização do carbono (FRIEDLINGSTEIN; O’SULLIVAN; JONES, 2023).

No Brasil paralelo a esses acontecimentos globais, houve reflexo na legislação brasileira e na regulamentação da emissão dos gases GEE pelo Ministério do Meio Ambiente

(MMA). As principais legislações que tem como objetivo regulamentar as emissões de GEE são:

- Lei nº8723 de 28 de outubro de 1993 dispõe sobre a redução de emissão de poluentes por veículos automotores e dá outras providências.
- Lei nº 12.187 de 29 de novembro de 2009 é instituída a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) que oficializa a participação do Brasil voluntariamente na ação desenvolvida pela organização das nações unidas em reduzir as emissões de gases do efeito estufa entre 36,1% e 38,9% - em volume total isto é entre 1,168 GtCO₂ e 1,259 GtCO₂ - a fim de alcançar o desenvolvimento econômico e social sustentável esta lei define ainda desenvolvimento de planos setoriais para atuação dos âmbitos locais nessa iniciativa.
- Resolução do CONAMA nº438 de 30 de dezembro de 2011, que visa regulamentar o sistema de cotas de emissões de gases do efeito estufa.
- Na resolução nº 491 de 19 de novembro de 2018 é disposto pelo CONAMA os padrões de qualidades do ar. No decreto nº 10.144 de 28 de novembro de 2019 é instituída a Comissão Nacional para Redução das Emissões de Gases de Efeito Estufa.
- No decreto nº 10.144 de 28 de novembro de 2019 é instituída a Comissão Nacional para Redução das Emissões de Gases de Efeito Estufa.

Esses regulamentos e leis tem como objetivo implementar medidas que auxiliem na redução das emissões do GEE, de forma a promover práticas sustentáveis que mitiguem o impacto que intensifica as mudanças climáticas.

A.3 Mecanismos de Incentivo a Redução das Emissões dos GEE

Devido a essa necessidade global, a visibilidade sobre o impacto da emissão dos GEE vem aumentando a cada ano, atrelado diretamente ao aumento da demanda por sustentabilidade nas organizações. Devido a esse direcionamento do mercado, diversos mecanismos e maneiras de lidar com a valoração desses impactos foram desenvolvidos.

A.3.1 Certificações de Neutralidade de CO₂ Equivalente (CO₂E)

Na atualidade as certificações são uma vantagem competitiva de extrema importância para as organizações, pois são uma forma de atestar determinado processo ou elemento da organização aos seus clientes, em âmbito nacional e internacional. Outro ponto importante é que também auxiliam na imagem construída para investidores.

Essa ferramenta de gestão também pode ser utilizada para certificar aspectos ambientais, a ISO 14064 (2016, 2018) é um padrão internacional relacionado a Gestão de Emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) e pode ser certificada a qualquer organização de todos os tipos de atividades e setores. A versão brasileira da norma ISO 14064 foi elaborada pelo Comitê Brasileiro de Gestão Ambiental – ABNT/ CB-38 por meio de seu Subcomitê de Mudanças Climáticas e publicada no dia 05 de novembro de 2007 e oficialmente lançada em 21 de novembro de 2007 (CASTKA; BALZAROVA, 2008).

Outra ferramenta reconhecida internacionalmente é o GHG Protocol, que tem como objetivo a contabilização das Emissões dos GEE e é aplicável a qualquer organização de todos os tipos de atividades e setores (SPRINGER, 2003).

Dentre os benefícios para as organizações de terem certificações de neutralidade de CO_2 : melhora a imagem da empresa através do seu compromisso com as mudanças climáticas, permite medir o progresso contínuo de redução da emissão de GEE, competitividade e rentabilidade no longo prazo, parcerias novas ou aprimoradas, clientes mais satisfeitos e fiéis, melhor reputação de responsabilidade corporativa. No entanto, é importante lembrar que a certificação não é a solução para o problema das emissões.

A.3.2 Carbono Equivalente e Pegada de Carbono

O Carbono Equivalente, é uma forma de medida utilizada para contabilizar o impacto ambiental das emissões dos GEE, representa a quantidade de CO_2 equivalente emitida por outros gases do efeito estufa, permitindo converter o impacto em uma mesma forma de contabilização, possibilitando que esses sejam comparados. A medida *Global Warming Potential* (GWP), ou, Potencial de aquecimento global, é a capacidade do gás absorver o calor da atmosfera terrestre, em determinado tempo (FAGAN, 1991).

A molécula de CO_2 sempre terá índice de GWP igual a 1, e 1 kg de CO_2 vale 0,2727 kg de CO_2E , já que é considerado apenas a massa das moléculas de carbono em um quilo de CO_2 . Temos como exemplo o gás metano CH_4 que possui um GWP 23 vezes maior que a molécula de CO_2 . Logo, 1 kg de metano equivale $23 \times 0,2727 = 6,2721$ kg de CO_2E .

Já a Pegada de Carbono é a quantia total de gases GEE gerados por determinada pessoa, empresa, país, etc. Ela é medida em toneladas de CO_2 equivalente (tCO_2E), e inclui emissões diretas ou indiretas. É utilizada como forma de entendimento do impacto das atividades humanas no meio ambiente, de forma a possibilitar a identificação dos locais onde há mais emissão e direcionar a priorização de tomada de ação. Também pode ser utilizada como forma de avaliação de desempenho, incentivando as organizações a criarem consciência sobre seus próprios impactos (PANDEY; AGRAWAL; PANDEY, 2011).

No mercado há consultorias que trabalham especificamente com o suporte para

a redução das emissões de carbono de empresas como a WayCarbon, Compensa, SGS Société Générale de Surveillance SA e Bureau Veritas. Outro ponto interessante é que também é possível que cada pessoa calcule sua pegada de carbono, com base nas emissões dada pelas atividades realizadas.

A.3.3 Créditos de Carbono

Uma importante criação que veio da instauração do Protocolo de Quioto e que foi impulsionado com o Acordo de Paris é o mercado de créditos de carbono, isto é, possibilitar a comercialização da redução de carbono advinda de ações tomadas pelas organizações, que teve vigor a partir de 2005. No Brasil, o decreto 5.882 de 2006 é quem regulamenta este mercado dos créditos de carbono.

Por definição, uma tonelada de emissão reduzida de emissão de carbono equivale a um crédito, sendo que pode ser vendido por empresas que reduziram essa emissão e comprado por empresas que pretendem compensar suas próprias emissões (POYER et al., 2020; ANDRADE; COSTA, 2008). Este instrumento financeiro, tem como objetivo incentivar as organizações a reduzirem as emissões e seu preço é determinado pelo mercado e pode variar ao longo do tempo.

Alguns críticos argumentam que a forma como o mercado de crédito de carbono é tratado não é efetiva, uma vez que não endereça as causas raízes da emissão e pode permitir que organizações continuem a emitir os poluentes sem mudanças significantes na sua operação. Por outro lado, defensores argumentam que essa flexibilidade é necessária para endereçar esse aspecto a nível global (MICHAELOWA; SHISHLOV; BRESCIA, 2019).

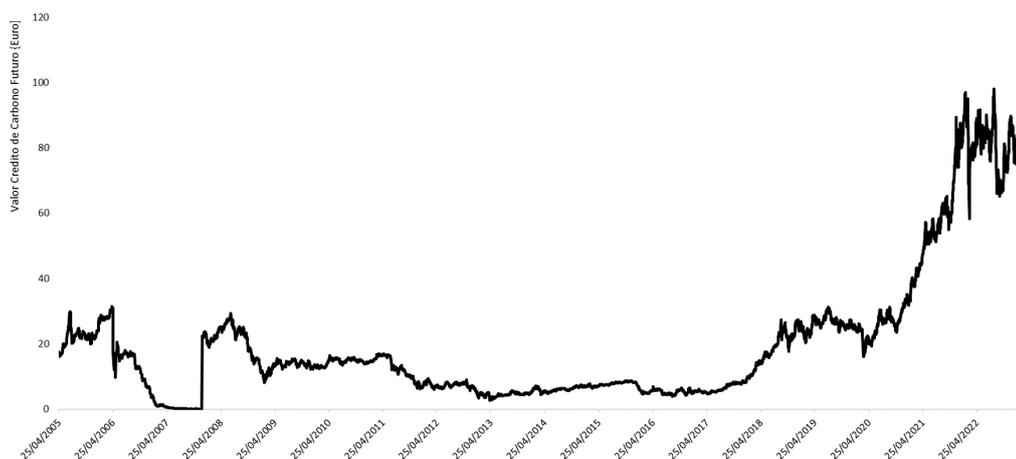


Figura 37 – Valor do Crédito de Carbono Futuro de 2005 até 2023 na bolsa de valores

Fonte: Bolsa de Valores

Dentre as vantagens que provém de mecanismo, pode-se citar o incentivo a redução das emissões, ao fomento da inovação nas organizações, por ser uma nova necessidade e ser

uma receita financeira. Dentre as desvantagens e dificuldades neste tópico, pode-se citar a complexidade na implementação e nas regulamentações de determinado país, a dificuldade de precisão e integridade dos dados no cálculo das reduções e a inequidade, uma vez que países e organizações mais ricos podem comprar mais créditos ao invés de direcionar os esforços para a redução (MICHAELOWA; SHISHLOV; BRESCIA, 2019).

Na figura 37 temos apresentado o valor histórico dos créditos de carbono futuro, de 2005 até 2023, segundo a bolsa de valores.

APÊNDICE B – Dados Computacionais

Tabela 44 – Dados computacionais do experimento 1

Inst.	Modelo	Tempo Execução (seg.)	Nós Explorados no Branch and Bound	Restrições lineares	Colunas (variáveis)	Variáveis binárias	Iterações
1	LSMVRP-F2	0,47	451	737	506	399	10.667
1	CarbonLSMVRP	1,23	570	1.547	1.486	1.134	28.926
2	LSMVRP-F2	2,97	1.932	1.012	742	574	50.399
2	CarbonLSMVRP	8,72	4.440	2.057	2.022	1.534	201.308
3	LSMVRP-F2	1.208,75	250.241	1.351	1.040	795	15.821.907
3	CarbonLSMVRP	108,13	35.319	2.661	2.660	2.010	

Tabela 45 – Dados computacionais do experimento 2

Inst.	Modelo	Tempo Execução (seg.)	Nós Explorados no Branch and Bound	Restrições lineares	Colunas (variáveis)	Variáveis binárias	Iterações
4	LSMVRP-F2	18,47	9.682	737	506	399	264.856
4	CarbonLSMVRP	134,84	65.107	1.547	1.486	1.134	1.708.642
5	LSMVRP-F2	66,16	26.601	1.012	742	574	1.703.881
5	CarbonLSMVRP	17,59	4.230	2.057	2.022	1.534	299.717
6	LSMVRP-F2	45.084,87	2.951.925	1.799	1.364	1.051	277.697.128
6	CarbonLSMVRP	39.919,22	622.499	3.633	3.632	2.752	173.897.956

Tabela 46 – Dados computacionais do experimento 3

Inst.	Modelo	Tempo Execução (seg.)	Nós Explorados no Branch and Bound	Restrições lineares	Colunas (variáveis)	Variáveis binárias	Iterações
7A	CarbonLSMVRP	30,66	9.148	1.547	996	644	339.691
7B	CarbonLSMVRP	38,27	17.951	1.547	996	644	632.391
7C	CarbonLSMVRP	81,02	18.828	1.547	996	644	806.185
8A	CarbonLSMVRP	3.420,80	1.157.335	2.057	1.382	894	35.621.095
8B	CarbonLSMVRP	3.353,08	1.593.914	2.057	1.382	894	37.886.571
8C	CarbonLSMVRP	1.995,67	784.82	2.057	1.382	894	22.148.246
9A	CarbonLSMVRP	60.714,23	3.367.328	3.633	3.632	2.752	652.223.137
9B	CarbonLSMVRP	4.276,51	364.260	3.633	3.632	2.752	57.601.891
9C	CarbonLSMVRP	7.626,50	601.058	3.633	3.632	2.752	187.352.856

Tabela 47 – Dados computacionais do experimento 4

Inst.	Modelo	Tempo Execução (seg.)	Nós Explorados no Branch and Bound	Restrições lineares	Colunas (variáveis)	Variáveis binárias	Iterações
10A	CarbonLSMVRP	30,66	9.148	1.547	996	644	339.691
10B	CarbonLSMVRP	32,67	10.902	1.547	1.486	1.134	381.612
11A	CarbonLSMVRP	3.420,80	1.157.335	1.382	894	1.534	35.621.095
11B	CarbonLSMVRP	780,01	266.888	2.057	2.022	1.534	8.433.733
12A	CarbonLSMVRP	60.714,23	3.367.328	3.633	3.632	2.752	652.223.137
12B	CarbonLSMVRP	17.490,00	2.072.714	3.633	3.632	2.752	358.237.304

Tabela 48 – Dados computacionais do experimento 5

Inst.	Modelo	Tempo Execução (seg.)	Nós Explorados no Branch and Bound	Restrições lineares	Colunas (variáveis)	Variáveis binárias	Iterações
13A	CarbonLSMVRP	23,97	8.287	1.547	1.486	1.134	272.229
13B	CarbonLSMVRP	6,14	3.780	1.547	1.486	1.134	97.988
14A	CarbonLSMVRP	6.305,45	1.350.919	2.057	2.022	1.534	62.573.267
14B	CarbonLSMVRP	1.169,33	444.759	2.057	2.022	1.534	15.553.829

ANEXO A – Modelo CarbonLSMVRP

$$\begin{aligned}
 \min \sum_{a \in C} \sum_{t \in T} h_a I_{at} + \sum_{a \in C} \sum_{b \in C} \sum_{t \in T} \hat{c}_{ab} z_{abt} \\
 + (p_f + \bar{e} p_c) \\
 (\sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{k} \bar{N} \bar{V} \bar{d}_{ij} \sum_{vel} l_{ijr}^{vel} / \bar{v}^{vel} \\
 + \sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{w} \bar{\alpha}_{ij} \bar{d}_{ij} \bar{\gamma} w_{ijr} \\
 + \sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{\alpha}_{ij} \bar{d}_{ij} \bar{\gamma} f_{ijr} \\
 + \sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{\beta} \bar{d}_{ij} \bar{\gamma} \sum_{vel} l_{ijr}^{vel} (\bar{v}^{vel})^2)
 \end{aligned} \tag{A.1}$$

$$I_{a,t-1} + x_{at} = \sum_{r=1}^R \sum_{p \in P} \eta_{ap} Q_{prt} + I_{at} \quad a \in C, t \in T. \tag{A.2}$$

$$I_{a,t-1} \geq \sum_{r=1}^R \sum_{p \in P} \eta_{at} Q_{prt} \quad a \in C, t \in T. \tag{A.3}$$

$$I_{at} \geq I_a^{min} \quad a \in C, t \in T. \tag{A.4}$$

$$\sum_{a \in C} \rho_a x_{at} + \sum_{a \in C} \sum_{b \in C} \zeta_{ab} z_{abt} \leq K_t \quad t \in T. \tag{A.5}$$

$$x_{at} \leq \bar{M}_{at} (y_{at} + \sum_{b \in C} z_{bat}) \quad a \in C, t \in T. \tag{A.6}$$

$$y_{at} + \sum_{b \in C} z_{bat} = y_{a,t+1} + \sum_{b \in C} z_{abt} \quad a \in C, t \in T. \tag{A.7}$$

$$\sum_{a \in C} y_{at} = 1 \quad t \in T. \tag{A.8}$$

$$\pi_{at} \geq \pi_{bt} + 1 - |C|(1 - z_{bat}) \quad a \in C, b \in C, t \in T. \tag{A.9}$$

$$\sum_{j \in \bar{C} \cup \{n+1\}} w_{0jr} = 1 \quad r = 1, \dots, R. \tag{A.10}$$

$$\sum_{i \in \bar{C} \cup \{0\}} w_{i(n+1)r} = 1 \quad r = 1, \dots, R. \tag{A.11}$$

$$\sum_{j \in \bar{C} \cup \{n+1\}} w_{ijr} = \sum_{j \in \bar{C} \cup \{0\}} w_{jir} \quad i \in \bar{C}, r = 1, \dots, R. \tag{A.12}$$

$$\sum_{i \in \bar{C} \cup \{0\}} \sum_{r=1}^R w_{ijr} = 1 \quad j \in \bar{C}. \tag{A.13}$$

$$\sum_{i \in \bar{C}} w_{0ir} \geq \sum_{i \in \bar{C}} w_{0i(r+1)} \quad r = 1, \dots, R-1. \quad (\text{A.14})$$

$$Q_{prt} \leq \min\left\{\left[\frac{\max \theta_v}{\varphi_p}\right], \sum_{i \in \bar{C}} d_{pi}\right\} \phi_{0rt} \quad p \in P, r = 1, \dots, R, t \in T. \quad (\text{A.15})$$

$$\sum_{t \in T} Q_{prt} = \sum_{i \in \bar{C}} d_{pi} \left(\sum_{j \in \bar{C} \cup \{n+1\}} w_{ijr} \right) \quad p \in P, r = 1, \dots, R. \quad (\text{A.16})$$

$$\sum_{t \in T} \phi_{irt} = \sum_{j \in \bar{C} \cup \{n+1\}} w_{ijr} \quad i \in \bar{C}, r = 1, \dots, R. \quad (\text{A.17})$$

$$\sum_{t \in T} \phi_{0rt} = 1 - w_{0(n+1)r} \quad r = 1, \dots, R. \quad (\text{A.18})$$

$$\sum_{t \in T} \phi_{0rt} = \sum_{t \in T} \phi_{(n+1)rt} \quad r = 1, \dots, R. \quad (\text{A.19})$$

$$\sum_{t \in T} \delta_{it} \phi_{irt} \leq \mu_{ir} \leq \sum_{t \in T} \bar{\delta}_{it} \phi_{irt} \quad i \in N, r = 1, \dots, R. \quad (\text{A.20})$$

$$\mu_{jr} \geq \mu_{0r} + \lambda \left(\sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \varphi_p Q_{prt} \right) + \sum_{vel} (\bar{d}_{0j} / \bar{v}^{vel}) l_{0jr}^{vel} - M_{0j} (1 - w_{0jr}) \quad j \in \bar{C}, r = 1, \dots, R. \quad (\text{A.21})$$

$$\mu_{jr} \geq \mu_{ir} + \lambda \left(\sum_{p \in P} \varphi_p c_{pi} \right) + \sum_{vel} (\bar{d}_{ij} / \bar{v}^{vel}) l_{ijr}^{vel} - M_{ij} (1 - w_{ijr}) \quad (\text{A.22})$$

$$\forall i \in \bar{C}, j \in \bar{C} \cup \{n+1\}, r = 1, \dots, R : i \neq j.$$

$$\mu_{ir} \leq \Delta_i \sum_{j \in \bar{C} \cup \{n+1\}} w_{ijr} \quad i \in \bar{C}, r = 1, \dots, R. \quad (\text{A.23})$$

$$\mu_{0s} \geq \mu_{(n+1)r} - \bar{\delta}_{(n+1)|T|} (2 - \alpha_{rv} - \alpha_{sv}) \quad v \in V, r, s = 1, \dots, R : r < s. \quad (\text{A.24})$$

$$\sum_{p \in P} \varphi_p \left(\sum_{t \in T} Q_{prt} \right) \leq \sum_{v \in V} \theta_v \alpha_{rv} \quad r = 1, \dots, R. \quad (\text{A.25})$$

$$\sum_{v \in V} \alpha_{rv} = \sum_{t \in T} \phi_{0rt} \quad r = 1, \dots, R. \quad (\text{A.26})$$

$$\sum_{vel}^{VEL} l_{ijr}^{vel} = w_{ijr} \quad \forall i, j \in N, r = 1, \dots, R. \quad (\text{A.27})$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{t \in T} Q_{prt} \varphi_p = \sum_{j \in \bar{C}} f_{0jr} \quad r = 1, \dots, R. \quad (\text{A.28})$$

$$\sum_{p \in P} d_{pj} \varphi_p w_{ijr} \leq f_{ijr} \quad \forall i, j \in N, r = 1, \dots, R. \quad (\text{A.29})$$

$$f_{ijr} \leq \theta_v w_{ijr} \quad \forall i, j \in N, v \in V, r = 1, \dots, R. \quad (\text{A.30})$$

$$\sum_{j=0}^{N-1} f_{jir} - \sum_{k=1}^N f_{ikr} = \sum_p d_{pi} \varphi_p \sum_{j=0}^{N-1} w_{jir} \quad \forall i \in N, r = 1, \dots, R. \quad (\text{A.31})$$

Domínio das variáveis

$$x_{at}, I_{at}, \pi_{at} \geq 0 \quad a \in C, t \in T. \quad (\text{A.32})$$

$$\mu_{ir} \geq 0 \quad i \in N, r = 1, \dots, R. \quad (\text{A.33})$$

$$Q_{prt} \geq 0 \quad p \in P, r = 1, \dots, R, t \in T. \quad (\text{A.34})$$

$$f_{ijr} \geq 0 \quad i, j \in N, r = 1, \dots, R. \quad (\text{A.35})$$

$$y_{at}, z_{abt} \in \{0, 1\} \quad a \in C, b \in C, t \in T. \quad (\text{A.36})$$

$$\phi_{irt} \in \{0, 1\} \quad i \in N, r = 1, \dots, R, t \in T. \quad (\text{A.37})$$

$$w_{ijr} \in \{0, 1\} \quad i, j \in N, i \neq j, r = 1, \dots, R. \quad (\text{A.38})$$

$$\alpha_{rv} \in \{0, 1\} \quad r = 1, \dots, R, v \in V. \quad (\text{A.39})$$

$$l_{ijr}^{vel} \in \{0, 1\} \quad i, j \in N, r = 1, \dots, R, vel \in VEL. \quad (\text{A.40})$$

ANEXO B – Modelo HeF-CarbonLSMVRP

$$\begin{aligned}
 & \min \sum_{a \in C} \sum_{t \in T} h_a I_{at} + \sum_{a \in C} \sum_{b \in C} \sum_{t \in T} \hat{c}_{ab} z_{abt} \\
 & + (p_f + \bar{e}p_c) \left(\sum_{v \in V} \sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{k}_v \bar{N}_v \bar{V}_v \bar{d}_{ij} \sum_{vel} l_{ijvr}^{vel} / \bar{v}^{vel} + \sum_{v \in V} \sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{w}_v \bar{\alpha} \bar{d}_{ij} \bar{\gamma}_v w_{ijvr} \right) \quad (B.1) \\
 & + \sum_{v \in V} \sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{\alpha} \bar{d}_{ij} \bar{\gamma}_v f_{ijvr} + \sum_{v \in V} \sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{\beta}_v \bar{d}_{ij} \bar{\gamma}_v \sum_{vel} l_{ijvr}^{vel} (\bar{v}^{vel})^2
 \end{aligned}$$

$$I_{a,t-1} + x_{at} = \sum_{v \in V} \sum_{r=1}^R \sum_{p \in P} \eta_{ap} Q_{pvrt} + I_{at} \quad a \in C, t \in T. \quad (B.2)$$

$$I_{a,t-1} \geq \sum_{v \in V} \sum_{r=1}^R \sum_{p \in P} \eta_{at} Q_{pvrt} \quad a \in C, t \in T. \quad (B.3)$$

$$I_{at} \geq I_a^{min} \quad a \in C, t \in T. \quad (B.4)$$

$$\sum_{a \in C} \rho_a x_{at} + \sum_{a \in C} \sum_{b \in C} \zeta_{ab} z_{abt} \leq K_t \quad t \in T. \quad (B.5)$$

$$x_{at} \leq \bar{M}_{at} (y_{at} + \sum_{b \in C} z_{bat}) \quad a \in C, t \in T. \quad (B.6)$$

$$y_{at} + \sum_{b \in C} z_{bat} = y_{a,t+1} + \sum_{b \in C} z_{abt} \quad a \in C, t \in T. \quad (B.7)$$

$$\sum_{a \in C} y_{at} = 1 \quad t \in T. \quad (B.8)$$

$$\pi_{at} \geq \pi_{bt} + 1 - |C|(1 - z_{bat}) \quad a \in C, b \in C, t \in T. \quad (B.9)$$

$$\sum_{j \in \bar{C} \cup \{n+1\}} w_{0jvr} = 1 \quad v \in V, r = 1, \dots, R. \quad (B.10)$$

$$\sum_{i \in \bar{C} \cup \{0\}} w_{i(n+1)vr} = 1 \quad v \in V, r = 1, \dots, R. \quad (B.11)$$

$$\sum_{j \in \bar{C} \cup \{n+1\}} w_{ijvr} = \sum_{j \in \bar{C} \cup \{0\}} w_{jivr} \quad i \in \bar{C}, v \in V, r = 1, \dots, R. \quad (B.12)$$

$$\sum_{i \in \bar{C} \cup \{0\}} \sum_{v \in V} \sum_{r=1}^R w_{ijvr} = 1 \quad j \in \bar{C}. \quad (B.13)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{r=1}^R \sum_{j \in \bar{C}} w_{0jvr} \leq R \quad (B.14)$$

$$\sum_{i \in \bar{C}} w_{0ivr} \geq \sum_{i \in \bar{C}} w_{0iv(r+1)} \quad v \in V, r = 1, \dots, R-1. \quad (B.15)$$

$$Q_{pvrt} \leq \min\left\{\left\lfloor \frac{\theta_v}{\varphi_p} \right\rfloor, \sum_{i \in C} d_{pi}\right\} \phi_{0vrt} \quad p \in P, v \in V, r = 1, \dots, R, t \in T. \quad (\text{B.16})$$

$$\sum_{t \in T} Q_{pvrt} = \sum_{i \in C} d_{pi} \left(\sum_{j \in \bar{C} \cup \{n+1\}} w_{ijvr} \right) \quad p \in P, v \in V, r = 1, \dots, R. \quad (\text{B.17})$$

$$\sum_{t \in T} \phi_{ivrt} = \sum_{j \in \bar{C} \cup \{n+1\}} w_{ijvr} \quad i \in \bar{C}, v \in V, r = 1, \dots, R. \quad (\text{B.18})$$

$$\sum_{t \in T} \phi_{0vrt} = 1 - w_{0(n+1)vr} \quad v \in V, r = 1, \dots, R. \quad (\text{B.19})$$

$$\sum_{t \in T} \phi_{0vrt} = \sum_{t \in T} \phi_{(n+1)vrt} \quad v \in V, r = 1, \dots, R. \quad (\text{B.20})$$

$$\sum_{t \in T} \delta_{it} \phi_{ivrt} \leq \mu_{ivr} \leq \sum_{t \in T} \bar{\delta}_{it} \phi_{ivrt} \quad i \in N, v \in V, r = 1, \dots, R. \quad (\text{B.21})$$

$$\mu_{jvr} \geq \mu_{0vr} + \lambda \left(\sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \varphi_p Q_{pvrt} \right) + \sum_{vel} (\bar{d}_{0j} / \bar{v}^{vel}) l_{0jvr}^{vel} - M_{0j} (1 - w_{0jvr}) \quad (\text{B.22})$$

$$j \in \bar{C}, v \in V, r = 1, \dots, R.$$

$$\mu_{jvr} \geq \mu_{ivr} + \lambda \left(\sum_{p \in P} \varphi_p d_{pi} \right) + \sum_{vel} (\bar{d}_{ij} / \bar{v}^{vel}) l_{ijvr}^{vel} - M_{ij} (1 - w_{ijvr}) \quad (\text{B.23})$$

$$\forall i \in \bar{C}, j \in \bar{C} \cup \{n+1\}, v \in V, r = 1, \dots, R : i \neq j.$$

$$\mu_{ivr} \leq \Delta_i \sum_{j \in \bar{C} \cup \{n+1\}} w_{ijvr} \quad i \in \bar{C}, v \in V, r = 1, \dots, R. \quad (\text{B.24})$$

$$\mu_{0v(r+1)} \geq \mu_{(n+1)vr} - \bar{\delta}_{(n+1)|T|} (1 - \sum_{j \in \bar{C}} w_{0jv(r+1)}) \quad v \in V, r = 1, \dots, R-1. \quad (\text{B.25})$$

$$\sum_{p \in P} \varphi_p \left(\sum_{t \in T} Q_{pvrt} \right) \leq \theta_v \quad v \in V, r = 1, \dots, R. \quad (\text{B.26})$$

$$\sum_{vel}^{VEL} l_{ijvr}^{vel} = w_{ijvr} \quad \forall i, j \in N, v \in V, r = 1, \dots, R. \quad (\text{B.27})$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{t \in T} Q_{pvrt} \varphi_p = \sum_{j \in C} f_{0jvr} \quad v \in V, r = 1, \dots, R. \quad (\text{B.28})$$

$$\sum_{p \in P} d_{pj} \varphi_p w_{ijvr} \leq f_{ijvr} \quad \forall i, j \in N, v \in V, r = 1, \dots, R. \quad (\text{B.29})$$

$$f_{ijvr} \leq \theta_v w_{ijvr} \quad \forall i, j \in N, v \in V, r = 1, \dots, R. \quad (\text{B.30})$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{j=0}^{N-1} f_{jivr} - \sum_{v \in V} \sum_{j=1}^N f_{ijvr} = \sum_p d_{pi} \varphi_p \sum_{v \in V} \sum_{j=0}^{N-1} w_{jivr} \quad \forall i \in N, r = 1, \dots, R. \quad (\text{B.31})$$

Domínio das variáveis

$$x_{at}, I_{at}, \pi_{at} \geq 0 \quad a \in C, t \in T. \quad (\text{B.32})$$

$$\mu_{ivr} \geq 0 \quad i \in N, v \in V, r = 1, \dots, R. \quad (\text{B.33})$$

$$Q_{pvr} \geq 0 \quad p \in P, v \in V, r = 1, \dots, R, t \in T. \quad (\text{B.34})$$

$$f_{ijvr} \geq 0 \quad i, j \in N, v \in V, r = 1, \dots, R. \quad (\text{B.35})$$

$$y_{at}, z_{abt} \in \{0, 1\} \quad a \in C, b \in C, t \in T. \quad (\text{B.36})$$

$$\phi_{ivrt} \in \{0, 1\} \quad i \in N, v \in V, r = 1, \dots, R, t \in T. \quad (\text{B.37})$$

$$w_{ijvr} \in \{0, 1\} \quad i, j \in N, i \neq j, v \in V, r = 1, \dots, R. \quad (\text{B.38})$$

$$l_{ijvr}^{vel} \in \{0, 1\} \quad i, j \in N, v \in V, r = 1, \dots, R, vel \in VEL. \quad (\text{B.39})$$

ANEXO C – Modelagem de Betkas e Laporte (2011)

$$\begin{aligned} \min(p_f + \bar{e}p_c) & \left(\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{k} \bar{N} \bar{V} \bar{d}_{ij} \sum_{vel=1}^{VEL} l_{ij}^{vel} / \bar{v}^{vel} \right. \\ & + \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{\gamma} \bar{w} \bar{\alpha}_{ij} \bar{d}_{ij} w_{ij} \\ & \left. + \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{\gamma} \bar{\alpha}_{ij} \bar{d}_{ij} f_{ij} \right) \end{aligned} \quad (C.1)$$

$$\begin{aligned} & + \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} \bar{\lambda} \bar{\gamma} \beta \bar{d}_{ij} \sum_{vel=1}^{VEL} l_{ij}^{vel} (\bar{v}^{vel})^2 \\ & \sum_{j \in N} w_{0j} = \bar{m} \end{aligned} \quad (C.2)$$

$$\sum_{j \in N} w_{ij} = 1 \quad i \in N \quad (C.3)$$

$$\sum_{i \in N} w_{ij} = 1 \quad j \in N \quad (C.4)$$

$$\sum_{j \in N} f_{ji} - \sum_{j \in N} f_{ij} = d_i \quad i \in N \quad (C.5)$$

$$d_i w_{ij} \leq f_{ij} \leq (\theta - d_i) w_{ij} \quad (ij) \in A \quad (C.6)$$

$$\mu_i - \mu_j + \bar{t}_i + \sum_{vel}^{VEL} (\bar{d}_{ij} / \bar{v}^{vel}) l_{ij}^{vel} \leq M_{ij} (1 - w_{ij}) \quad i \in N, j \in N, i \neq j \quad (C.7)$$

$$\delta_i \leq \mu_i \leq \bar{\delta}_i \quad j \in N \quad (C.8)$$

$$\bar{\mu}_j + \bar{\tau}_j - s_j + \sum_{vel}^{VEL} (\bar{d}_{0j} / \bar{v}^{vel}) l_{j0}^{vel} \leq L (1 - w_{j0}) \quad j \in N \quad (C.9)$$

$$\sum_{vel}^{VEL} l_{ij}^{vel} = w_{ij} \quad (i, j) \in A \quad (C.10)$$

$$w_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i, j) \in A \quad (C.11)$$

$$f_{ij} \geq 0 \quad (i, j) \in A \quad (C.12)$$

$$l_{ij}^r \in \{0, 1\} \quad (i, j) \in A, r \in R \quad (C.13)$$

ANEXO D – Modelagem de Xiao et al. (2012)

$$\min \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N p_f d_{ij} (p_0 w_{ij} + \frac{\bar{\rho}^* - \bar{\rho}_0}{\theta} f_{ij}) \quad (\text{D.1})$$

$$\sum_{j=0}^N w_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, N. \quad (\text{D.2})$$

$$\sum_{j=0}^N w_{ij} - \sum_{j=0}^N w_{ji} = 0, \quad i = 0, \dots, N. \quad (\text{D.3})$$

$$\sum_{j=0}^N f_{ij} - \sum_{j=0}^N f_{ji} = \bar{d}_i, \quad i = 0, \dots, N, j \neq i. \quad (\text{D.4})$$

$$f_{ij} \leq \theta w_{ij} \quad i, j = 0, \dots, N. \quad (\text{D.5})$$

$$w_{i,j} \in \{0, 1\} \quad (i, j) \in N. \quad (\text{D.6})$$

ANEXO E – LSMVRP-F2 de Miranda et al. (2019)

$$\sum_{a \in C} \sum_{t \in T} h_a I_{at} + \sum_{a \in C} \sum_{b \in C} \sum_{t \in T} \hat{c}_{ab} z_{abt} + \sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} c_{ij} w_{ijr} \quad (\text{E.1})$$

$$I_{a,t-1} + x_{at} = \sum_{r=1}^R \sum_{p \in P} \eta_{ap} Q_{prt} + I_{at} \quad a \in C, t \in T. \quad (\text{E.2})$$

$$I_{a,t-1} \geq \sum_{r=1}^R \sum_{p \in P} \eta_{at} Q_{prt} \quad a \in C, t \in T. \quad (\text{E.3})$$

$$I_{at} \geq I_a^{\min} \quad a \in C, t \in T. \quad (\text{E.4})$$

$$\sum_{a \in C} \rho_a x_{at} + \sum_{a \in C} \sum_{b \in C} \zeta_{ab} z_{abt} \leq K_t \quad t \in T. \quad (\text{E.5})$$

$$x_{at} \leq \bar{M}_{at} (y_{at} + \sum_{b \in C} z_{bat}) \quad a \in C, t \in T. \quad (\text{E.6})$$

$$y_{at} + \sum_{b \in C} z_{bat} = y_{a,t+1} + \sum_{b \in C} z_{abt} \quad a \in C, t \in T. \quad (\text{E.7})$$

$$\sum_{a \in C} y_{at} = 1 \quad t \in T. \quad (\text{E.8})$$

$$\pi_{at} \geq \pi_{bt} + 1 - |C|(1 - z_{bat}) \quad a \in C, b \in C, t \in T. \quad (\text{E.9})$$

$$\sum_{j \in \bar{C} \cup \{n+1\}} w_{0jr} = 1 \quad r = 1, \dots, R. \quad (\text{E.10})$$

$$\sum_{i \in \bar{C} \cup \{0\}} w_{i(n+1)r} = 1 \quad r = 1, \dots, R. \quad (\text{E.11})$$

$$\sum_{j \in \bar{C} \cup \{n+1\}} w_{ijr} = \sum_{j \in \bar{C} \cup \{0\}} w_{jir} \quad i \in \bar{C}, r = 1, \dots, R. \quad (\text{E.12})$$

$$\sum_{i \in \bar{C} \cup \{0\}} \sum_{r=1}^R w_{ijr} = 1 \quad j \in \bar{C}. \quad (\text{E.13})$$

$$\sum_{i \in \bar{C}} w_{0ir} \geq \sum_{i \in \bar{C}} w_{0i(r+1)} \quad r = 1, \dots, R-1. \quad (\text{E.14})$$

$$Q_{prt} \leq \min\left\{\left\lfloor \frac{\max \theta_v}{\varphi_p} \right\rfloor, \sum_{i \in C} d_{pi}\right\} \phi_{0rt} \quad p \in P, r = 1, \dots, R, t \in T. \quad (\text{E.15})$$

$$\sum_{t \in T} Q_{prt} = \sum_{i \in C} d_{pi} \left(\sum_{j \in \bar{C} \cup \{n+1\}} w_{ijr} \right) \quad p \in P, r = 1, \dots, R. \quad (\text{E.16})$$

$$\sum_{t \in T} \phi_{irt} = \sum_{j \in \bar{C} \cup \{n+1\}} w_{ijr} \quad i \in \bar{C}, r = 1, \dots, R. \quad (\text{E.17})$$

$$\sum_{t \in T} \phi_{0rt} = 1 - w_{0(n+1)r} \quad r = 1, \dots, R. \quad (\text{E.18})$$

$$\sum_{t \in T} \phi_{0rt} = \sum_{t \in T} \phi_{(n+1)rt} \quad r = 1, \dots, R. \quad (\text{E.19})$$

$$\sum_{t \in T} \delta_{it} \phi_{irt} \leq \mu_{ir} \leq \sum_{t \in T} \bar{\delta}_{it} \phi_{irt} \quad i \in N, r = 1, \dots, R. \quad (\text{E.20})$$

$$\mu_{jr} \geq \mu_{0r} + \lambda \left(\sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \varphi_p Q_{prt} \right) + \tau_{0j} - M_{0j} (1 - w_{0jr}) \quad j \in \bar{C}, r = 1, \dots, R. \quad (\text{E.21})$$

$$\mu_{jr} \geq \mu_{ir} + s_i + \tau_{ij} - M_{ij} (1 - w_{ijr}) \quad i \in \bar{C}, j \in \bar{C} \cup \{n+1\}, r = 1, \dots, R : i \neq j. \quad (\text{E.22})$$

$$\mu_{ir} \leq \Delta_i \sum_{j \in \bar{C} \cup \{n+1\}} w_{ijr} \quad i \in \bar{C}, r = 1, \dots, R. \quad (\text{E.23})$$

$$\mu_{0s} \geq \mu_{(n+1)r} - \bar{\delta}_{(n+1)|T|} (2 - \alpha_{rv} - \alpha_{sv}) \quad v \in V, r, s = 1, \dots, R : r < s. \quad (\text{E.24})$$

$$\sum_{p \in P} \varphi_p \left(\sum_{t \in T} Q_{prt} \right) \leq \sum_{v \in V} \theta_v \alpha_{rv} \quad r = 1, \dots, R. \quad (\text{E.25})$$

$$\sum_{v \in V} \alpha_{rv} = \sum_{t \in T} \phi_{0rt} \quad r = 1, \dots, R. \quad (\text{E.26})$$

$$x_{at}, I_{at}, \pi_{at} \geq 0 \quad a \in C, t \in T. \quad (\text{E.27})$$

$$\mu_{ir} \geq 0 \quad i \in N, r = 1, \dots, R. \quad (\text{E.28})$$

$$Q_{prt} \geq 0 \quad p \in P, r = 1, \dots, R, t \in T. \quad (\text{E.29})$$

$$q_{pir} \geq 0 \quad p \in P, i \in \bar{C}, r = 1, \dots, R. \quad (\text{E.30})$$

$$y_{at}, z_{abt} \in \{0, 1\} \quad a \in C, b \in C, t \in T. \quad (\text{E.31})$$

$$\phi_{irt} \in \{0, 1\} \quad i \in N, r = 1, \dots, R, t \in T. \quad (\text{E.32})$$

$$w_{ijr} \in \{0, 1\} \quad i, j \in N, i \neq j, r = 1, \dots, R. \quad (\text{E.33})$$

$$\alpha_{rv} \in \{0, 1\} \quad r = 1, \dots, R, v \in V. \quad (\text{E.34})$$

ANEXO F – Dados das Instâncias

Neste anexo são apresentadas os dados particulares das instâncias do capítulo 6. Na tabela estão apresentados os tamanhos das dimensões dos conjuntos das instâncias.

Tabela 49 – Dimensão das instâncias

Instância	nT	nCo	nR	nP	nC	nV	nVel
1	3	5	5	3	3	2	1
2	4	6	6	4	4	2	1
3	5	7	7	5	5	2	1
4	3	5	5	3	3	2	1
5	4	6	6	4	4	2	1
6	5	7	7	5	5	2	1
7A	3	5	5	3	3	2	1
7B	3	5	5	3	3	2	1
7C	3	5	5	3	3	2	1
8A	4	6	6	4	4	2	1
8B	4	6	6	4	4	2	1
8C	4	6	6	4	4	2	1
9A	5	7	7	5	5	2	1
9B	5	7	7	5	5	2	1
9C	5	7	7	5	5	2	1
10A	3	5	5	3	3	2	1
10B	3	5	5	3	3	2	3
11A	4	6	6	4	4	2	1
11B	4	6	6	4	4	2	3
12A	5	7	7	5	5	2	1
12B	5	7	7	5	5	2	3
13A	3	5	5	3	3	2	3
13B	3	5	5	3	3	2	3
14A	4	6	6	3	5	2	3
14B	4	6	6	3	5	2	3

nT = número de períodos; nCo = número de nós sem contar o depósito; nR = número de rotas; nP = número de produtos; nC = número de componentes; nV = número de veículos; nVel = número de velocidades;

F.1 Quantidade de unidades de componentes para produzir uma unidade do produto

Tabela 50 – Quantidade de unidades de componentes para produzir uma unidade do produto - Conjunto de Instâncias 1, 4, 7, 10, 13, 15

	Produto 1	Produto 2	Produto 3
Componente 1	1	5	0
Componente 2	3	5	0
Componente 3	4	3	1

Tabela 51 – Quantidade de unidades de componentes para produzir uma unidade do produto - Conjunto de Instâncias 2, 5, 8, 11, 14, 16

	Produto 1	Produto 2	Produto 3	Produto 4
Componente 1	1	5	0	1
Componente 2	3	5	0	1
Componente 3	4	3	1	2
Componente 4	2	0	5	4

Tabela 52 – Quantidade de unidades de componentes para produzir uma unidade do produto- Conjunto de Instâncias 3, 6, 9, 12

	Produto 1	Produto 2	Produto 3	Produto 4	Produto 5
Componente 1	1	5	0	1	2
Componente 2	3	5	0	1	3
Componente 3	4	3	1	2	4
Componente 4	2	0	5	4	0
Componente 5	0	2	3	0	1

F.2 Unidade de tempo para troca de produção dos componentes

Tabela 53 – Unidade de tempo para troca de produção dos componentes- Conjunto de Instâncias 1, 4, 7, 10, 13, 15

Componente	1	2	3
1	0	8	8
2	7	0	8
3	9	10	0

Tabela 54 – Unidade de tempo para troca de produção dos componentes - Conjunto de Instâncias 2, 5, 8, 11, 14, 16

Componente	1	2	3	4
1	0	8	8	6
2	7	0	8	5
3	9	10	0	7
4	6	4	5	0

Tabela 55 – Unidade de tempo para troca de produção dos componentes - Conjunto de Instâncias 3, 6, 9, 12

Componente	1	2	3	4	5
1	0	8	8	6	3
2	7	0	8	5	4
3	9	10	0	7	2
4	6	4	5	0	1
5	3	5	2	4	0

F.3 Demanda dos clientes pelos produtos

Tabela 56 – Demanda dos clientes pelos produtos - Conjunto de Instâncias 1, 4, 7, 10, 13, 15

	Cliente 1	Cliente 2	Cliente 3	Cliente 4	Cliente 5
Produto 1	44	14	94	52	24
Produto 2	61	58	21	11	82
Produto 3	16	80	61	40	38

Tabela 57 – Demanda dos clientes pelos produtos - Conjunto de Instâncias 2, 5, 8, 11, 14, 16

	Cliente 1	Cliente 2	Cliente 3	Cliente 4	Cliente 5	Cliente 6
Produto 1	44	14	94	52	24	10
Produto 2	61	58	21	11	82	22
Produto 3	16	80	61	40	38	19
Produto 4	32	10	24	21	11	31

Tabela 58 – Demanda dos clientes pelos produtos - Conjunto de Instâncias 3, 6, 9, 12

	Cliente 1	Cliente 2	Cliente 3	Cliente 4	Cliente 5	Cliente 6	Cliente 7
Produto 1	44	14	94	52	24	10	30
Produto 2	61	58	21	11	82	22	12
Produto 3	16	80	61	40	38	19	21
Produto 4	32	10	24	21	11	31	81
Produto 5	12	22	13	31	49	61	43

F.4 Coordenadas

Tabela 59 – Coordenadas - Conjunto de Instâncias 1, 4

	Coordenada Horizontal	Coordenada Vertical
Depósito	264	225
Cliente 1	82	41
Cliente 2	301	114
Cliente 3	131	457
Cliente 4	327	76
Cliente 5	345	413

Tabela 60 – Coordenadas - Conjunto de Instâncias 2, 5

	Coordenada Horizontal	Coordenada Vertical
Depósito	264	225
Cliente 1	82	41
Cliente 2	301	114
Cliente 3	131	457
Cliente 4	327	76
Cliente 5	345	413
Cliente 6	201	112

Tabela 61 – Coordenadas - Conjunto de Instâncias 3, 6

	Coordenada Horizontal	Coordenada Vertical
Depósito	264	225
Cliente 1	82	41
Cliente 2	301	114
Cliente 3	131	457
Cliente 4	327	76
Cliente 5	345	413
Cliente 6	201	112
Cliente 7	21	302