

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

CRISTIANE MARIA DEFALQUE

Otimização Multiobjetivo Aplicada a Processos Logísticos de Resíduos de Papel: Abordagens de Programação por Metas Determinísticas e Sob Incerteza

Guaratinguetá

2021

Cristiane Maria Defalque

Otimização Multiobjetivo Aplicada a Processos Logísticos de Resíduos de Papel: Abordagens de Programação por Metas Determinísticas e Sob Incerteza

Tese apresentada ao Conselho de Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de doutora em Engenharia Mecânica .

Orientador: Profº Dr. Aneirson Francisco da Silva
Coorientador: Profº Dr. Fernando Augusto Silva Marins

Guaratinguetá

2021

D313o Defalque, Cristiane Maria
Otimização multiobjetivo aplicada a processos logísticos de resíduos de papel: abordagens de programação por metas determinísticas e sob incerteza / Cristiane Maria Defalque – Guaratinguetá, 2021
167 f. : il.
Bibliografia: f. 124-138

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021.
Orientador: Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva
Coorientador: Prof. Dr. Fernando Augusto Silva Marins

1. Logística reversa. 2. Processo decisório. 3. Programação linear.
I. Título.

CDU 65.012.4(043)

Luciana Máximo

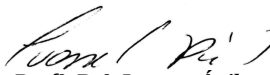
Bibliotecária-CRB-8/3595

CRISTIANE MARIA DEFALQUE

**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTORA EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: DOUTORADO**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof.ª. Dr.ª. Ivonete Ávila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:



PROF. DR. ANEIRSON FRANCISCO DA SILVA

Orientador / UNESP/FEG
participou por videoconferência



PROFA. DRA. ANA PAULA BARBOSA PÓVOA

Universidade de Lisboa
participou por videoconferência



PROFA. DRA. ELI ANGELA VITOR TOSO

Universidade Federal de São Carlos
participou por videoconferência



PROF. DR. ANTÔNIO AUGUSTO CHAVES

Universidade Federal de São Paulo
participou por videoconferência



PROF. DR. RAFAEL DE CARVALHO MIRANDA

UNIFEI
participou por videoconferência

Junho de 2021

DADOS CURRICULARES

CRISTIANE MARIA DEFALQUE

NASCIMENTO 18 de setembro de 1986 - Birigui / SP

FILIAÇÃO José Defalque Sobrinho
Eunice Maria de Moraes Defalque

2004 / 2007 Licenciatura em Matemática
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

2008 / 2010 Mestrado em Matemática
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas de São José do Rio Preto

Aos meus pais Eunice e José.

Ao meu irmão Guilherme.

Ao meu marido Diego.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida. Aos professores Aneirson e Fernando Marins, pela orientação, paciência e incentivo. Aos membros da banca, pela colaboração e pelas valiosas contribuições. Aos meus pais e ao meu irmão que sempre me apoiaram incondicionalmente. Ao meu marido Diego, pela paciência, ajuda e apoio nos momentos mais difíceis. Aos meus amigos Coronel Amauri Harvey, Coronel Ben Hur, Coronel Martins, Major Leoni, Major Túlio e Capitão Villa Nova, que sempre me deram força para continuar. Às minhas amigas Manuella, Alyne e Débora e à minha professora de inglês Christina, pela amizade e por toda ajuda durante o curso. Aos meus amigos do mestrado Marcos (in Memoriam) e Wallace, pela amizade e por serem pessoas inspiradoras: humildes, competentes e fortes. À minha orientadora do mestrado, professora Socorro Rangel, por me inspirar e mostrar o caminho da pesquisa. Aos amigos da EsAO e da EsPCEEx, pelo apoio no início e no final do curso, respectivamente. Aos gestores das empresas, por entenderem a importância do trabalho e fornecerem informações essenciais para a sua elaboração. A todos os professores, funcionários e amigos da FEG que direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração deste trabalho. À FAPESP, CNPq e CAPES pelo apoio financeiro.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - números dos processos 2018/06858-0 e 2018/14433-0.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - código de financiamento 001.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - números dos processos 302730/2018-4 e 303350/2018-0.

RESUMO

Neste estudo, foi elaborado um modelo de programação linear inteira mista multiobjetivo, multiproduto, multinível e multiperíodo para otimizar processos logísticos de centros intermediário cujos objetivos envolvem a maximização da quantidade coletada e do atendimento à demanda de fardos, a minimização da distância percorrida entre os pontos de coleta e dos custos. Para lidar com os múltiplos objetivos, foram utilizadas as abordagens de programação por metas ponderada e lexicográfica. A programação por metas multiescolha revisada também foi utilizada para incorporar incerteza na quantidade disponível para a coleta. Para a análise do modelo proposto, foram realizados testes computacionais com instâncias baseadas em dados da literatura e em dados reais de uma empresa brasileira do setor. Para todos os testes realizados, a linguagem *General Algebraic Modeling System 23.6.5* e o *solver CPLEX 12.2.0.2* foram utilizados para modelagem e otimização. Embora o modelo lexicográfico tenha apresentado dificuldades para encontrar soluções viáveis em alguns testes com dados reais, as abordagens determinísticas apresentaram bons resultados e mostraram que as formulações podem auxiliar o gestor no processo de tomada de decisão. Verificou-se ainda que a variação de parâmetros pode aumentar a dificuldade do modelo, o que torna difícil, muitas vezes, encontrar uma boa solução viável. Apesar disso, o modelo sob incerteza apresentou resultados competitivos em relação ao modelo determinístico, principalmente por permitir a representação de vários cenários. De uma forma geral, os resultados apontaram diferentes possibilidades de solução para auxiliar o planejamento logístico, não só sob o ponto de vista econômico, mas também ambiental e social.

PALAVRAS-CHAVE: Programação por Metas Ponderada. Programação por Metas Lexicográfica. Programação por Metas Multiescolha Revisada. Reciclagem de papel. Logística Reversa.

ABSTRACT

In this study, a mixed multiobjective, multiproduct, multilevel, and multiperiod integer linear programming model has been developed to optimize logistics processes of intermediate centers whose objectives comprehend maximizing the collected quantity and meeting demand, minimizing the distance traveled between the collection points and costs. Weighted and lexicographic goal programmings have been used to deal with the multiple objectives. The revised multi-choice goal programming has also been used to incorporate uncertainty into the quantity available for collection. For the analysis of the proposed model, computational tests have been executed with instances based on literature data and real data of a Brazilian company in the sector. For all the performed tests, General Algebraic Modeling System 23.6.5 language and CPLEX 12.2.0.2 solver have been used for modeling and optimization. Although the lexicographic model presented difficulties to find viable solutions in some tests with real data, the deterministic approaches have presented good results and have shown that the formulations can assist managers in the decision-making process. It has also been verified that the variation of parameters can increase the difficulty of the model, which often makes it difficult to find a good viable solution. Despite this, the model under uncertainty has shown competitive results concerning the deterministic model, mainly because it allows to represent various scenarios. In general, results showed different solution possibilities to assist with logistical planning, not only from an economic point of view, but also environmental and social.

KEYWORDS: Weighted Goal Programming. Lexicographic Goal Programming. Revised Multi-choice Goal Programming. Waste Paper Recycling. Reverse Logistics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação da pesquisa	21
Figura 2 – Etapas da pesquisa	22
Figura 3 – Análise de coocorrência de palavras-chave de publicações encontradas nas bases de dados Scopus e Web of Science: associação geral entre os nós; nó " <i>paper industry</i> "; nó " <i>optimization</i> "	29
Figura 4 – Método de pesquisa - logística e reciclagem de resíduos de papel	31
Figura 5 – Evolução das publicações	33
Figura 6 – Evolução da média das citações por ano	34
Figura 7 – Etapas da reciclagem de resíduos de papel	34
Figura 8 – Etapas resumidas da reciclagem de resíduos de papel	37
Figura 9 – Aplicações reais em redes de diferentes regiões	37
Figura 10 – Rede conceitual para relacionar a rede de reciclagem de resíduos de papel com os principais aspectos estudados	44
Figura 11 – Etapas do processo logístico de resíduos de papel consideradas na modelagem	51
Figura 12 – Exemplo de roteamento entre os pontos de coleta.	53
Figura 13 – Valores dos desvios conforme a variação das prioridades de T1	69
Figura 14 – Valores dos desvios conforme a variação das prioridades de T2	69
Figura 15 – Valores dos desvios conforme a variação das prioridades de T3	70
Figura 16 – Valores dos desvios conforme a variação das prioridades de T4	71
Figura 17 – Valores dos desvios conforme a variação das prioridades de T5	71
Figura 18 – Valores dos desvios conforme a variação das prioridades de T6	72
Figura 19 – Comparação entre os testes - Prioridade P1	73
Figura 20 – Comparação entre os testes - Prioridade P2	73
Figura 21 – Comparação entre os testes - Prioridade P3	74
Figura 22 – Comparação entre os testes - Prioridade P4	74
Figura 23 – Comparação entre os testes - Prioridade P5	75
Figura 24 – Comparação entre os testes - Prioridade P6	75
Figura 25 – Comparação entre os testes - Prioridade P7	76
Figura 26 – Comparação entre os testes - Prioridade P8	76
Figura 27 – Comparação entre os testes - Prioridade P9	77
Figura 28 – Soma dos tempos de processamento de cada etapa conforme a ordem de otimização	78
Figura 29 – Soma dos tempos de processamento de cada etapa, conforme a ordem de otimização	80
Figura 30 – Rota e quantidade coletada por ponto de coleta d - PS1	81
Figura 31 – Rota e quantidade coletada por ponto de coleta d - PS5	82
Figura 32 – Rota e quantidade coletada por ponto de coleta d - WGP	82
Figura 33 – Quantidade entregue pelos fornecedores	83

Figura 34 – Estoque de fardos	83
Figura 35 – Tempo de execução - Testes realizados com os métodos LGP e WGP	93
Figura 36 – Custos de estoque e transporte - Testes com $kpc_{dt} > 0$	96
Figura 37 – Custos de estoque e transporte - Testes com $kpc_{dt} = 0$	97
Figura 38 – Quantidade coletada - Testes com $kpc_{dt} > 0$	98
Figura 39 – Quantidade coletada - Testes com $kpc_{dt} = 0$	98
Figura 40 – Atendimento à Demanda - Testes com $kpc_{dt} > 0$	102
Figura 41 – Atendimento à Demanda - Testes com $kpc_{dt} = 0$	103
Figura 42 – Rota e quantidade coletada - Teste T1 - Métodos WGP e LGP (L3, L5 e L6) . . .	111
Figura 43 – Rota e quantidade coletada - Teste T2 - Métodos WGP e LGP (L3, L5 e L6) . . .	112
Figura 44 – Rotas - Métodos WGP e LGP (L3, L5 e L6)	112
Figura 45 – Tempo de execução - Testes realizados com o método lexicográfico	114
Figura 46 – GAP - Modelos determinístico e sob incerteza	117
Figura 47 – Estágio 1: evolução das publicações	141
Figura 48 – Análise de coocorrência de palavras-chave de publicações encontradas na base de dados Scopus: associação geral entre os nós; nó "logística reversa"; nó "multiobjetivo"; nó "incerteza"	142
Figura 49 – Análise de coocorrência de palavras-chave de publicações encontradas na base de dados Web of Science (WEB OF SCIENCE, 2019): associação geral entre os nós; nó "logística reversa"; nó "multiobjetivo"; nó "incerteza"	142
Figura 50 – Estágio 2: evolução das publicações	146

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo da Revisão de Literatura	19
Quadro 2 – Artigos selecionados de referências de outros artigos	30
Quadro 3 – Características dos artigos revisados	32
Quadro 4 – Etapas nos artigos analisados	36
Quadro 5 – Análise dos objetivos em relação aos pilares da sustentabilidade	40
Quadro 6 – Formulações e técnicas	41
Quadro 7 – Técnicas de incerteza usadas nos artigos	42
Quadro 8 – Valores dos parâmetros para o exemplar ilustrativo T1	65
Quadro 9 – Testes realizados com os exemplares ilustrativos	66
Quadro 10 – Nomenclatura para as expressões que compõem a função objetivo	66
Quadro 11 – Prioridades de Otimização	67
Quadro 12 – Prioridade P10 de otimização	67
Quadro 13 – Prioridades conforme as unidades de medidas das metas	78
Quadro 14 – Capacidades dos veículos utilizados pela empresa	86
Quadro 15 – Valores dos parâmetros para o exemplar R1	88
Quadro 16 – Testes realizados com dados reais	89
Quadro 17 – Prioridades conforme as grandezas das metas	90
Quadro 18 – Testes considerando pontos de coleta diária	108
Quadro 19 – Método de Pesquisa - otimização e gerenciamento de resíduos sólidos	140
Quadro 20 – Artigos de revisão envolvendo otimização e questões de sustentabilidade	144
Quadro 21 – Algumas sugestões para pesquisas futuras encontradas em artigos revisados	148
Quadro 22 – Método de aplicação da Programação por Metas	151
Quadro 23 – Características encontradas em artigos revisados que usam a abordagem Programação por Metas	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados dos testes realizados com os exemplares ilustrativos - LGP	67
Tabela 2 – Resultados dos testes realizados com os exemplares ilustrativos - LGP - Prioridades conforme as unidades de medidas das metas	79
Tabela 3 – Resultados dos testes realizados com os exemplares ilustrativos - WGP	80
Tabela 4 – Resultados dos testes realizados considerando o método WGP	90
Tabela 5 – Resultados dos testes realizados considerando o método WGP e $kpc_{dt} = 0, \forall d, t$.	90
Tabela 6 – Resultados dos testes realizados considerando as prioridades L1 e L2	91
Tabela 7 – Resultados dos testes realizados considerando as prioridades L1 e L2 e $kpc_{dt} =$ $0, \forall d, t$	91
Tabela 8 – Dimensões dos problemas	92
Tabela 9 – Dimensões dos problemas após o <i>presolve</i>	92
Tabela 10 – Valores de df_{ict}^- - Teste WER1	94
Tabela 11 – Valores de df_{ict}^- - Teste WER4	95
Tabela 12 – Coleta por veículo b no período t - Empresa A	99
Tabela 13 – Coleta por veículo b no período t - Teste WR5	99
Tabela 14 – Coleta por veículo b no período t - Teste L1ER5	100
Tabela 15 – Coleta por veículo b no período t - Teste WER5	100
Tabela 16 – Estoque por período - Teste WER5	101
Tabela 17 – Estoque por período - Dados reais	102
Tabela 18 – Número de viagens por veículo (θ_{bt})	104
Tabela 19 – Valores de β_{b1t} ([t])	104
Tabela 20 – Coleta por veículo b no período t - Teste L1KER5	105
Tabela 21 – Coleta por veículo b no período t - Teste WKER5	106
Tabela 22 – Coleta por veículo b no período t - Teste L1KER5-2	107
Tabela 23 – Coleta por veículo b no período t - Teste WKER5-2	107
Tabela 24 – Resultados dos testes - Valores de Z_2 ([km])	109
Tabela 25 – Resultados dos testes - Valores de Z_3 ([t])	109
Tabela 26 – Resultados dos testes - Valores de Z_4 ([t])	109
Tabela 27 – Resultados dos testes - Valores de Z_6 ([t])	109
Tabela 28 – Quantidade coletada por período ([t]) - Métodos WGP e LGP (L3, L5 e L6) . . .	110
Tabela 29 – Distância percorrida por período ([km]) - Métodos WGP e LGP (L3, L5 e L6) . .	111
Tabela 30 – Testes com 23 períodos	113
Tabela 31 – Quantidade de gases emitidos ([km]) - Métodos WGP e LGP (L3, L5 e L6)	115
Tabela 32 – Quantidade coletada ao longo do horizonte de planejamento ([t])	116
Tabela 33 – Valores da variável auxiliar y ([t])	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANP	<i>Analytic Network Process</i>
FGP	<i>Fuzzy goal programming</i>
GP	<i>Goal programming</i>
IFGP	<i>Interactive fuzzy goal programming</i>
LGP	<i>Lexicographic goal programming</i>
LR	Logística Reversa
OECD	<i>Organization for Economic Co-operation and Development</i>
PL	Programação Linear
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PNL	Programação Não Linear
PNLIM	Programação Não Linear Inteira Mista
SD	Sistemas Dinâmicos
TBL	<i>Triple Bottom Line</i>
TOPSIS	<i>Technique for the Order of Prioritization by Similarity to Ideal Solution</i>
WGP	<i>Weighted goal programming</i>
MCGP	<i>Multi-Choice goal programming</i>
RMCGP	<i>Revised Multi-Choice goal programming</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E QUESTÕES DE PESQUISA	16
1.2	OBJETIVOS E DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	17
1.3	JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	18
1.4	MATERIAIS E MÉTODOS	21
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	25
2	REVISÃO DE LITERATURA	26
2.1	INTRODUÇÃO	26
2.2	MÉTODO UTILIZADO PARA A REVISÃO	27
2.3	ANÁLISE E DISCUSSÃO	31
2.3.1	Evolução das publicações e das citações	33
2.3.2	Etapas em diferentes sistemas de reciclagem de papel	34
2.3.3	Objetivos sustentáveis, técnicas e incerteza nas formulações	39
2.3.4	Rede conceitual ligando aspectos quantitativos e considerações em relação a sugestões para pesquisas futuras	42
3	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E MODELAGEM MATEMÁTICA	47
3.1	LOGÍSTICA DE RESÍDUOS DE PAPEL NO BRASIL	47
3.2	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	48
3.3	MODELAGEM MATEMÁTICA	52
3.3.1	Modelo Matemático Proposto	52
3.3.2	Análise de alguns parâmetros considerados	63
3.3.3	Testes com exemplares ilustrativos	64
3.3.4	Programação por Metas Lexicográfica (LGP)	66
3.3.4.1	Comparação entre as prioridades por teste	68
3.3.4.2	Comparação entre os testes conforme a prioridade	72
3.3.5	Organização das prioridades conforme as unidades de medidas das metas	78
3.3.6	Programação por Metas Ponderada (WGP)	79
3.3.7	Coleta, Produção, Estoque e Demanda: WGP X (LGP - PS1) X (LGP - PS5)	80
4	EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS COM DADOS REAIS	86
4.1	TESTES REALIZADOS COM O MÉTODO WGP NORMALIZADO	89
4.2	TESTES REALIZADOS COM O MÉTODO LGP	90
4.2.1	Resultados dos testes considerando as sequências de prioridades L1 e L2	91
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS MODELOS LGP, WGP E OS DADOS REAIS	91
4.3.1	Custos	96

4.3.2	Coleta	97
4.3.3	Demanda	100
4.4	EXPERIMENTOS CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DE OUTROS RESÍDUOS	103
4.5	EXPERIMENTOS COM PONTOS DE COLETA DIÁRIA	107
4.6	TESTES COM 23 PERÍODOS	113
4.7	DISCUSSÃO SOBRE QUESTÕES DE SUSTENTABILIDADE	114
5	MODELO COM INCERTEZA	116
5.1	EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS	116
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	119
6.1	VERIFICAÇÃO DAS QUESTÕES DE PESQUISA E DOS OBJETIVOS	119
6.2	PRODUÇÃO CIENTÍFICA	122
	REFERÊNCIAS	124
	APÊNDICE A – REVISÃO DE LITERATURA - MÉTODOS DE OTIMI- ZAÇÃO PARA O GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓ- LIDOS	139
A.1	ESTÁGIO 1: OTIMIZAÇÃO, GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS E LOGÍS- TICA REVERSA	140
A.2	ESTÁGIO 2: LR, OTIMIZAÇÃO E INCERTEZA	143
A.3	OTIMIZAÇÃO SOB INCERTEZA	145
	APÊNDICE B – REVISÃO DE LITERATURA - MODELOS DE PROGRA- MAÇÃO POR METAS	150
B.1	MODELOS DETERMINÍSTICOS DE PROGRAMAÇÃO POR METAS	151
B.2	A PROGRAMAÇÃO POR METAS NA LITERATURA	153
	APÊNDICE C – PROGRAMAÇÃO POR METAS MULTIESCOLHA RE- VISADA	157
C.1	CONSIDERANDO INCERTEZA NO PROBLEMA ESTUDADO	158
C.1.1	Restrições com incerteza - Programação por Metas Ponderada Multiescolha Revisada (PMPMR)	161
	APÊNDICE D – MODELO AUXILIAR	164
	APÊNDICE E – MODELO WGP NORMALIZADO - TESTE T1 - EXEM- PLAR ILUSTRATIVO	166
	APÊNDICE F – MODELO AUXILIAR - EXEMPLAR ILUSTRATIVO	167

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E QUESTÕES DE PESQUISA

O conceito de sustentabilidade baseado em três pilares, ou *Triple Bottom Line (TBL)*, em que o desenvolvimento sustentável considera os desenvolvimentos econômico, ambiental e social, envolve fatores como: uso eficiente de recursos, gerenciamento efetivo de produtos, diminuição de resíduos, redução de emissões, diminuição dos impactos ambientais e aumento dos investimentos sociais (ELKINGTON, 1997; IPIECA/API, 2005).

Com o crescente consumo de recursos como consequência do aumento da população mundial, a geração de resíduos sólidos vem tomando grandes proporções. Segundo Hoornweg e Bhada-Tata (2012), em relação ao volume de resíduos sólidos municipais gerado em 2012, um aumento de aproximadamente 70% é esperado até 2025. No Brasil, em um estudo apresentado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), o aumento do volume de resíduos sólidos gerado de 2005 a 2015 foi de 26% (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2015).

Segundo um relatório de 2012 do Banco Mundial sobre o gerenciamento de resíduos sólidos o aumento desenfreado de resíduos sólidos contribui para a degradação ambiental, impactando na qualidade de vida da população e gerando custos extras para a sociedade, como, por exemplo, para a manutenção de aterros sanitários (HOORNWEG; BHADA-TATA, 2012). Considerando esta preocupação, a Logística Reversa (LR) está ganhando força como parte do gerenciamento da cadeia de suprimentos. Para ser eficiente, este gerenciamento requer planejamento, implementação e controle das operações da cadeia, considerando os processos reversos que envolvem a coleta, a inspeção, a reciclagem, remodelação e remanufatura dos produtos (ALUMUR et al., 2012; MELO; NICKEL; Saldanha-da-Gama, 2009).

Em se tratando do processo de reciclagem, o material retorna ao ciclo de produção ao ser reutilizado no processo produtivo de novos produtos (OECD, 2015; FLEISCHMANN et al., 1997). Para Melaré et al. (2017), alguns países são mais preocupados com a importância da reciclagem do que outros, fazendo o uso de tecnologias para otimizar este processo. De acordo com dados publicados pela secretaria-geral da OECD - *Organization for Economic Co-operation and Development* em 2015, Alemanha, Coreia do Sul, Eslovênia e Áustria são os líderes mundiais em reciclagem e compostagem de resíduos (no caso de resíduos biodegradáveis), com taxas de 65%, 59%, 58% e 58% respectivamente (OECD, 2015).

Ainda segundo a OECD (2015), alguns países em desenvolvimento não possuem políticas formais de coleta de resíduos, o que torna mais difícil estimar as taxas de recuperação e reciclagem. No Brasil, segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2015), aproximadamente 9% dos resíduos sólidos urbanos gerados em 2015 tiveram destinação imprópria.

Tendo em vista as necessidades sustentáveis apresentadas, a otimização do sistema de LR considerando objetivos que contemplam os pilares da sustentabilidade é foco de recentes pesquisas encontradas na literatura. Neste contexto, alguns trabalhos que integram a programação matemática e sistemas de

gerenciamento de resíduos têm como objetivo a otimização de fatores sustentáveis (SOLEIMANI et al., 2017; GOVINDAN; FATTAHI, 2017; FEITÓ-CESPÓN et al., 2017; ZHALECHIAN; TAVAKKOLI-MOGHADDAM; RAHIMI, 2017). Além disso, uma vez que situações reais envolvendo sistemas de LR geralmente incluem ambientes incertos, para tornar a modelagem de sistemas mais realista, há trabalhos que consideram abordagens não determinísticas, e métodos de solução envolvendo, por exemplo, programação estocástica, otimização robusta ou programação *fuzzy* têm sido encontrados na literatura (PISHVAEE; RABBANI; TORABI, 2011; HOSSEINZADEH; ROGHANIAN, 2012; GOVINDAN; PAAM; ABTAHI, 2016).

Em se tratando de resíduos de papel, verificou-se que muitos estudos sobre reciclagem de papel podem ser encontrados na literatura (ERVASTI; MIRANDA; KAURANEN, 2016b; SCHMIDT et al., 2007; VILLANUEVA; WENZEL, 2007). Entretanto, estudos que relacionam o planejamento de sistemas de reciclagem de resíduos de papel e métodos quantitativos para otimizar os processos envolvidos ainda são escassos (PATI; VRAT, 2010; SAHAMIE; STINDT; NUSS, 2013).

Poucos foram os trabalhos encontrados na literatura consultada envolvendo processos que são parte de um sistema específico, já que as condições e etapas dependem do material estudado (RUTKOWSKI; RUTKOWSKI, 2017). Neste contexto, como a região geográfica, a legislação e o nível de desenvolvimento do país também influenciam nas etapas do fluxo reverso (ERVASTI; MIRANDA; KAURANEN, 2016b), abordagens quantitativas aplicadas a diferentes realidades ainda não identificadas, como a brasileira, são boas oportunidades de pesquisa. Verificou-se, também, na literatura consultada, poucos trabalhos que combinaram programação linear inteira mista e modelos multiobjetivos, e não foram identificados trabalhos que consideraram processos específicos de centros intermediários, fundamentais para conectar a fase da coleta com a última fase do processo, quando acontece a reciclagem do material.

Assim, o presente trabalho foca na otimização das etapas logísticas de um sistema de reciclagem de resíduos de papel considerando os processos vivenciados por centros intermediários. O problema se resume em definir o quanto coletar em cada período de forma a maximizar a quantidade coletada de material relevante para a reciclagem, maximizar a produção de fardos, maximizar a venda de fardos e minimizar os custos. O problema estudado considera as variações de material que acontecem devido às alterações na disponibilidade dos resíduos. Além disso, é um problema que possui objetivos conflitantes relacionados à sustentabilidade, pois o aumento da quantidade de material coletada maximiza a produção e o atendimento à demanda de fardos, o que está diretamente relacionado ao aumento das taxas de reciclagem, mas maximiza também os custos.

Portanto, as questões de pesquisa que nortearam o desenvolvimento deste trabalho são as seguintes:

- De que forma é possível otimizar o sistema de reciclagem de resíduos de papel construindo um modelo cujos objetivos integram os pilares da sustentabilidade?
- Quais abordagens de solução deverão ser utilizadas?

1.2 OBJETIVOS E DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

O objetivo proposto neste trabalho é desenvolver um modelo de otimização multiobjetivo que contempla as etapas logísticas de reciclagem de resíduos de papel considerando questões relacionadas

à sustentabilidade.

Os objetivos específicos são listados a seguir:

- Identificar, por meio de visitas a cooperativas, setores apartados e centros de reciclagem como é o processo de gerenciamento desse tipo de resíduo, os tipos de produtos, os parâmetros e as oportunidades de melhoria.
- Verificar os processos de gerenciamento de resíduos de papel de empresas incluídas em sistemas de diferentes níveis de desenvolvimento.
- Identificar fatores importantes para o desenvolvimento sustentável em uma rede de reciclagem de resíduos de papel
- Identificar os dados disponíveis na literatura sobre reciclagem de resíduos de papel para também serem utilizados na validação do modelo.

A pesquisa foi delimitada da seguinte forma:

- Objeto de estudo: empresas que compõem a rede de logística reversa de resíduos de papel.
- Características: empresas que trabalham com coleta de resíduos de papel, produção e venda de fardos.

1.3 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

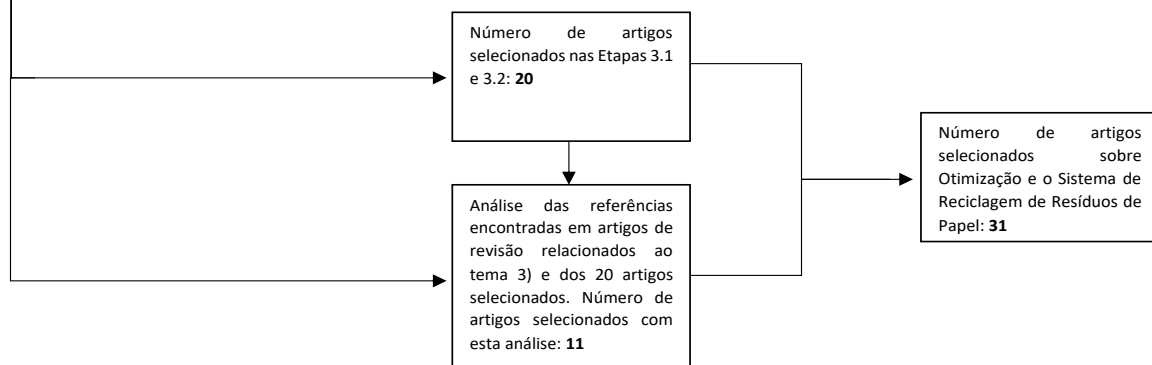
Em se tratando da literatura pesquisada, o Quadro 1 resume as abordagens de revisão da literatura realizadas para a identificação do estado da arte de pesquisas envolvendo modelagem quantitativa, otimização e logística reversa de resíduos de papel.

Primeiramente, um estudo envolvendo métodos de otimização e gerenciamento de resíduos sólidos, disponível no Apêndice A, foi realizado e a pesquisa na literatura foi dividida em duas etapas. A busca na Etapa 1 foi relacionada à otimização, gerenciamento de resíduos e logística reversa e a busca na Etapa 2 envolveu logística reversa, otimização multiobjetivo e incerteza.

Em seguida, uma pesquisa foi realizada com base nas sugestões encontradas nas Etapas 1 e 2 e detalhes de uma revisão de artigos envolvendo métodos quantitativos, otimização e sistemas de reciclagem de resíduos de papel estão no Capítulo 2.

Quadro 1 – Resumo da Revisão de Literatura

Etapas	Tema	Método de Busca	Número de artigos encontrados nas bases de dados	Análises	Critérios de inclusão/exclusão de artigos	Número de artigos selecionados após a verificação dos critérios
1)	Otimização, Gerenciamento de resíduos e Logística Reversa	Palavras - chave: "optimization" or "optimisation" and ("recycling" or "recycle" or "recycled" or "recyclable" or "recovery" or "remanufacturing" or "disposal and "reverse logistics" or "reverse supply chain" or "closed – loop supply chain")	603	I) Evolução das publicações. II) Análise de coocorrência das palavras-chave.	-	-
2)	Logística reversa, Multiobjetivo e Incerteza	Palavras - chave: "multi-objective" or "multiobjective" or "bi-objective" or "goal programming" and ("reverse logistics" or "reverse supply chain" or "closed – loop supply chain") and ("uncertain" or "uncertainty" or "risk" or "stochastic" or "robust" or "fuzzy" or "resilient" or "reliable")	182	I) Evolução das publicações II) Análise dos artigos e das sugestões de pesquisas futuras encontradas.	-	-
3.1)	Otimização e o Sistema de Reciclagem de Resíduos de Papel	Palavras- chave: "reverse" or "closed-loop" and (paper recovery" or "waste paper" or "scrap paper" or "recovered paper" or "used paper" or "paper recycling" or "recycling paper" or "paper industry" or "recyclable paper" or "recycled paper" or "paper waste" or "cardboard")	180	-	Seleção de artigos conforme os seguintes critérios: a) Estudar o planejamento da rede reversa de resíduos de papel. b) Apresentar um modelo quantitativo para otimizar as etapas do sistema reverso. c) Usar métodos quantitativos como abordagem de solução para o problema.	16
3.2)		Palavras - chave: Paper recovery" or "waste paper" or "scrap paper" or "recovered paper" or "used paper" or "paper recycling" or "recycling paper" or "paper industry" or "recyclable paper" or "recycled paper" or "paper waste" or "cardboard"	689	Análise de coocorrência das palavras-chave dos 689 artigos encontrados.	Seleção de artigos conforme os critérios definidos na etapa anterior.	4



Fonte: preparado pelo autor. Pesquisas realizadas nas bases de dados Scopus (SCOPUS, 2019) e Web of Science (WEB OF SCIENCE, 2019).

Ao final da terceira etapa do estudo, apenas 31 artigos foram encontrados e verificou-se que apesar de um tema relevante para a pesquisa, poucos são os estudos envolvendo modelos matemáticos e sistemas logísticos de reciclagem de resíduos de papel, e oportunidades de pesquisa relacionadas a este tema envolvem: objetivos relacionados aos pilares da sustentabilidade, o uso de diferentes técnicas de solução, modelos considerando incerteza, etapas específicas de diferentes sistemas reais de reciclagem de resíduos de papel, aplicações e estudos de caso de regiões ainda não pesquisadas e algumas combinações de métodos e técnicas.

Finalmente, foi realizado um estudo dentro dos trabalhos encontrados considerando os principais modelos de Programação por Metas. Um quadro comparativo das principais características de alguns trabalhos da literatura e do trabalho proposto foi incluído ao final do tópico (Apêndice B).

Devido às exigências para uma produção mais sustentável, o desenvolvimento de tecnologias para alinhar questões econômicas, ambientais e sociais pode ser um fator decisivo no mercado competitivo. Assim, este trabalho colabora com este processo ao desenvolver formulações e usar métodos e técnicas para as etapas logísticas de reciclagem de resíduos de papel apontando questões tecnológicas que podem auxiliar o entendimento dos fatores sustentáveis e o processo de tomada de decisão dos gestores para um gerenciamento mais eficiente da rede.

Assim, as formulações, métodos e técnicas propostos neste trabalho têm potencial para contribuir com os processos decisórios por meio de variação de dados e análise de cenários para verificar como, quando e quanto deve ser adquirido de um certo material para atendimento à demanda de fardos a fim de minimizar custos, empregar melhor a frota de veículos, diminuindo tempo e distância percorrida e maximizando a comercialização de resíduos de papel e conseqüentemente, aumentando os índices de reciclagem. Sob o ponto de vista social, como este trabalho contribui para o bom gerenciamento dos processos logísticos do setor, possibilita também o aumento do número de empregos e da renda do trabalhador.

Em se tratando da literatura pesquisada, este trabalho apresenta no Capítulo 2 abordagens de revisão específicas sobre artigos que apresentam modelos quantitativos para o planejamento de redes de reciclagem de resíduos de papel considerando otimização das etapas deste processo, a fim de analisar a evolução da pesquisa e encontrar sugestões para pesquisas futuras. As contribuições da pesquisa bibliográfica apresentada envolvem:

- Análise dos processos considerados nos artigos estudados e um resumo para ajudar a construir modelos matemáticos e conduzir investigações futuras.
- Análise dos objetivos encontrados nos modelos formulados, considerando fatores econômicos, ambientais e sociais.
- Identificação de formulações e técnicas usadas para promover a otimização de redes de reciclagem de resíduos de papel, apontando soluções que contribuem para a eficiência e desenvolvimento sustentável de redes.
- Investigação de parâmetros aleatórios e técnicas usadas para lidar com incerteza.
- Elaboração de uma rede conceitual que relaciona os processos de reciclagem de resíduos de papel aos aspectos estudados e a considerações para pesquisas futuras.

Desta forma, a revisão apresentada enriquece a literatura relacionada a métodos quantitativos para o gerenciamento de redes de reciclagem de resíduos de papel ou similares. A contribuição deste trabalho, portanto, envolve desde questões práticas relacionadas ao auxílio dos processos de tomada de decisões dos gestores das empresas até questões teóricas, ao identificar outras possibilidades para trabalhos futuros, não consideradas nesta pesquisa.

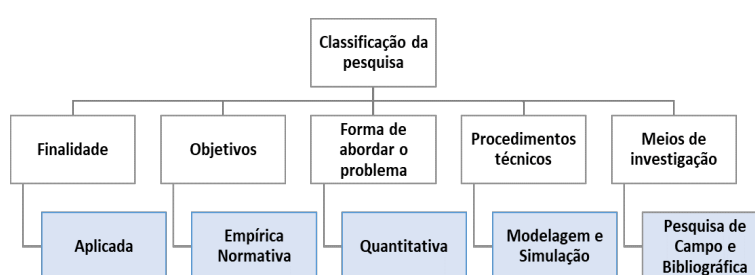
Este trabalho também contribui ao desenvolver novas formulações matemáticas combinando métodos como: a programação linear inteira mista, múltiplos objetivos, fatores associados à sustentabilidade e a programação por metas. Além disso, foram consideradas algumas etapas específicas de diferentes sistemas reais de reciclagem de resíduos de papel que podem auxiliar o entendimento dos fatores sustentáveis e o processo de tomada de decisão dos gestores para um gerenciamento mais eficiente da rede. Foi realizada uma aplicação a uma empresa brasileira, não identificada na literatura pesquisada.

Vale ressaltar que a modelagem apresentada neste trabalho inclui considerações não encontradas nos trabalhos da literatura consultada, representa situações reais e propõe soluções competitivas em relação às encontradas na prática, auxiliando os gestores a tomarem decisões cada vez mais inovadoras sob o ponto de vista da sustentabilidade.

1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

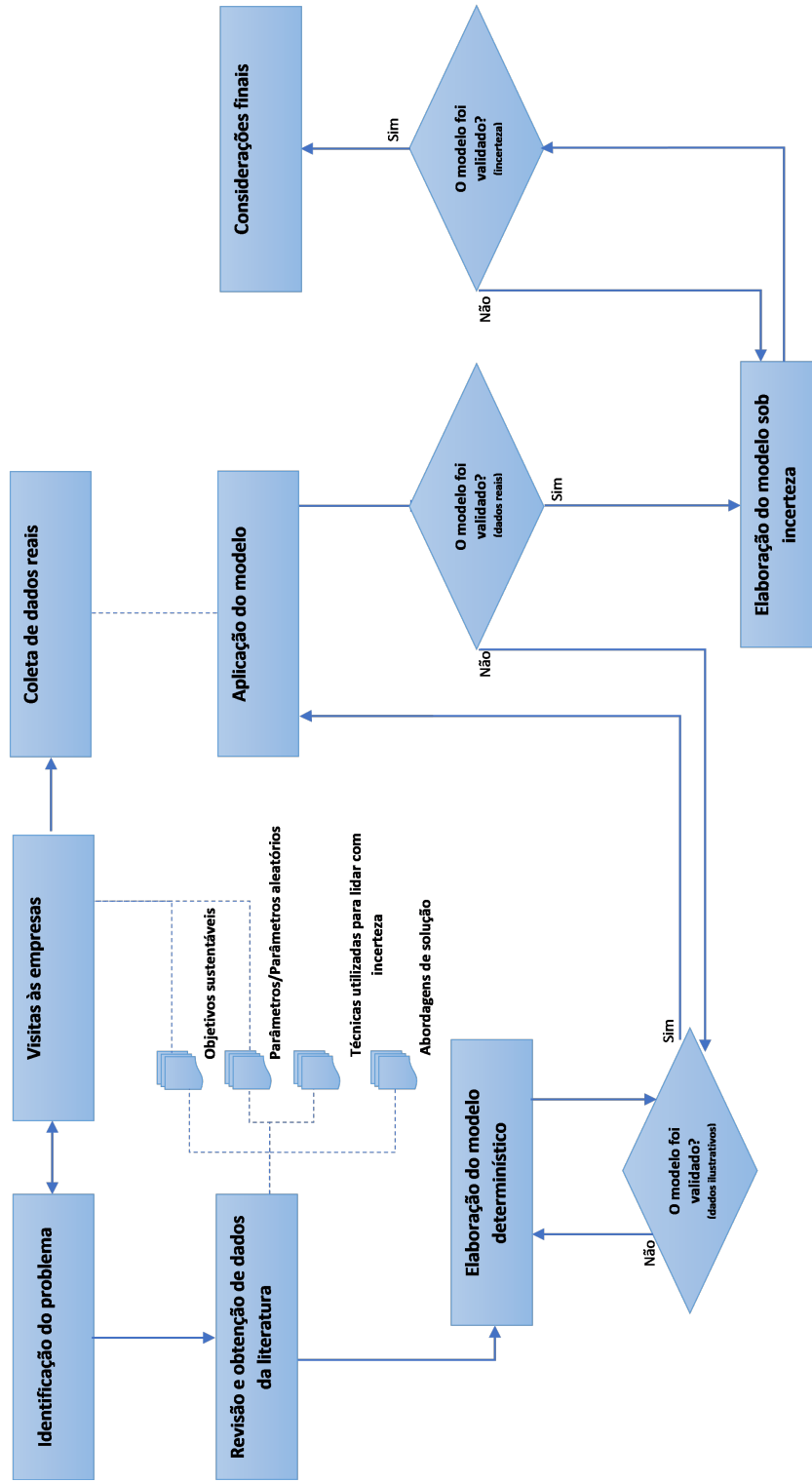
O problema de pesquisa deste trabalho envolve o desenvolvimento de um modelo matemático para otimizar as etapas logísticas da reciclagem de resíduos de papel. Desta forma, o método de pesquisa utilizado neste trabalho é a modelagem e simulação, já que o objetivo é construir um modelo matemático que represente situações reais e que proponha soluções competitivas com aquelas encontradas na prática. Portanto, a pesquisa é de natureza aplicada, empírica normativa, a forma abordada é a quantitativa e os meios de investigação envolvem a pesquisa de campo e a pesquisa bibliográfica (MARQUES et al., 2014; GIL, 2008; VERGARA, 2007; BERTRAND; FRANSOO, 2002; GIL, 1991), conforme ilustra a Figura 1. As etapas da pesquisa estão descritas na Figura 2 e estão explicadas a seguir. Mais detalhes sobre o problema estudado neste trabalho podem ser encontrados no Capítulo 3.

Figura 1 – Classificação da pesquisa



Fonte: classificação baseada nos estudos e definições de Marques et al. (2014), Gil (2008), Vergara (2007), Bertrand e Fransoo (2002) e Gil (1991).

Figura 2 – Etapas da pesquisa



Fonte: preparado pelo autor

Para identificar o problema de pesquisa, além da literatura consultada, foram realizadas visitas técnicas a alguns centros intermediários, conforme detalhado no Capítulo 3. Estas empresas fazem a intermediação do sistema logístico e são fundamentais para os processos que envolvem desde a etapa de coleta até a reciclagem. Assim, os objetivos e os parâmetros foram identificados com a ajuda da literatura e das observações e entrevistas com os gestores realizadas durante as visitas técnicas.

A primeira oportunidade de melhoria verificada envolve otimizar objetivos econômicos, como a minimização de custos, e ambientais, como aumentar as taxas de reciclagem ao maximizar as taxas de resíduo de papel coletado.

Uma segunda oportunidade de melhoria identificada durante as visitas e entrevistas está exatamente na etapa da coleta e recebimento de material. Para a coleta dos resíduos, os fornecedores fazem contato com o centro intermediário quando há material disponível. Muitos destes fornecedores não possuem espaço para armazenamento de material e, por esse motivo, o tempo combinado para o planejamento e coleta geralmente é pequeno (um dia ou menos, em alguns casos). Observou-se, também, a necessidade de melhorar o planejamento envolvendo o roteamento de veículos, já que quando o contato é realizado pelo fornecedor, em geral, o veículo disponível é destinado para a coleta e, muitas vezes, faz apenas o deslocamento do centro intermediário para um único fornecedor e retorna para o centro intermediário, mesmo com a capacidade ociosa.

Ainda em relação ao recebimento de material, verificou-se também a necessidade de planejamento envolvendo o material que não é coletado pelo centro intermediário, mas entregue na empresa pelos fornecedores.

Uma terceira oportunidade de melhoria refere-se ao planejamento envolvendo a produção de fardos e o atendimento à demanda. Segundo informações fornecidas pelos gestores e também identificadas na literatura, o fornecimento de material e a demanda de fardos variam ao longo do tempo. Há épocas do ano com grande quantidade de material disponível para coleta e pouca demanda de fardos, vice e versa. Assim, em alguns períodos, há necessidade de se manter algum nível de estoque.

Para a elaboração do modelo matemático, alguns parâmetros, técnicas e abordagens de solução utilizadas foram baseadas na literatura. Alguns parâmetros e objetivos relacionados à minimização de custos e à coleta de resíduos de papel, além da técnica de Programação por Metas, tiveram como inspiração principal o trabalho de Pati, Vrat e Kumar (2008a). Abordagens para o roteamento de veículos e restrições de eliminação de subrotas foram baseadas principalmente nas formulações encontradas em Anghinolfi et al. (2013), Defalque, Rangel e Ferreira (2011), Desrochers e Laporte (1991), Miller, Tucker e Zemlin (1960) e Toth e Vigo (2002).

No modelo determinístico, foi utilizado, primeiramente, a Programação por Metas Lexicográfica para resolver o modelo multiobjetivo e, em uma segunda análise, foram realizados testes com a Programação por Metas Ponderada (CHARNES; COOPER; FERGUSON, 1955; CHARNES; COOPER, 1961; ROMERO, 2004) já que têm sido bastante empregadas em problemas de gerenciamento (COLAPINTO; JAYARAMAN; MARSIGLIO, 2017). Como descrito em (ABDELAZIZ; AOUNI; FAYEDH, 2007), (CHANG, 2007), (COLAPINTO; JAYARAMAN; MARSIGLIO, 2017) e (ROMERO, 2004), a formulação original foi proposta por (CHARNES; COOPER; FERGUSON, 1955; CHARNES; COOPER, 1961). A Programação por Metas Ponderada foi empregada juntamente com a normalização

da soma (TAMIZ; JONES; ROMERO, 1998), pois há unidades de medidas diferentes entre os objetivos. Quando os valores dos coeficientes “do lado esquerdo” da restrição são pequenos se comparados aos valores das metas (“lado direito da restrição”), por apresentar divisores maiores, ao utilizar o Método de Normalização da Soma a possibilidade de distorções nos resultados é menor do que com o método de Normalização Euclidiana (TAMIZ; JONES; EL-DARZI, 1995; TAMIZ; JONES; ROMERO, 1998).

Basicamente, as etapas logísticas otimizadas pelo modelo envolvem o planejamento da coleta, da produção e do atendimento à demanda de fardos e, para um melhor entendimento do modelo elaborado, testes com exemplares ilustrativos utilizando dados da literatura foram realizados e os resultados obtidos foram analisados para verificar se estavam coerentes com o cenário estudado. Além disso, algumas informações obtidas durante as entrevistas com os gestores também foram úteis mesmo para a análise utilizando exemplares ilustrativos. Mais detalhes sobre a descrição do problema e sobre o modelo matemático desenvolvido podem ser encontrados no Capítulo 3.

Para incorporar incerteza, foi utilizada uma adaptação do modelo de Programação por Metas Multiescolha Revisado (em inglês *Revised Multi-Choice Goal Programming*) proposto por (CHANG, 2008). Este modelo, assim como o modelo de Programação por Metas Multiescolha (CHANG, 2007) auxilia o tomador de decisão a considerar incerteza nas constantes associadas aos limites dos recursos. Assim, o modelo é construído de acordo com as necessidades do gestor, facilitando a participação dos envolvidos e auxiliando o processo de tomada de decisão (SILVA; MARINS, 2015; CHANG, 2007; SINGH; SONIA, 2017).

No problema estudado, verificou-se variações diárias na quantidade de material disponível para a coleta que acontecem devido a variações na disponibilidade dos resíduos. Desta forma, a incerteza foi incorporada no parâmetro referente à quantidade de material disponível para coleta, que faz parte tanto de restrições flexíveis, como meta, quanto de restrições rígidas, como limitante.

Os dados reais coletados foram utilizados para aplicação e comparação dos modelos propostos (determinístico e sob incerteza) e envolvem a quantidade de material coletada em cada fornecedor, a quantidade de material entregue pelo fornecedor, as capacidades e níveis de estoque de cada material ao longo do horizonte de planejamento, os veículos utilizados para coleta, as demandas de fardos ao longo do horizonte de planejamento, custos totais da empresa, como custos operacionais, de transporte, de estoque, aquisição de material, entre outros, além dos tipos de resíduos coletados. A validação ocorreu por meio da ajuda dos gestores e análise comparativa com as informações dos relatórios da empresa.

Em todos os testes, utilizou-se a linguagem de modelagem *General Algebraic Modeling System* (GAMS) 23.6.5 (BROOKE; KENDRICK; MEERAUS, 1997; GAMS DEVELOPMENT CORPORATION, 2011) e o Solver CPLEX 12.2.0.2 (IBM, 2018; IBM, 2011) para resolver os modelos propostos. Os testes foram realizados em um computador Intel Core i7-9750H com 2.60GHz e 32GB de RAM, última geração.

Parâmetros, como *threads* e o uso de planos de corte, foram gerenciados pelo próprio CPLEX (*default*) (IBM, 2017), sendo o número total disponível de *threads* igual a 12. Os critérios para interrupção dos programas considerados foram o GAP 0% e o tempo limite de 10.800 segundos para todos os exemplares.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este texto está dividido da seguinte forma: no Capítulo 2 é apresentada uma revisão de literatura envolvendo métodos quantitativos aplicados à reciclagem de resíduos de papel e modelos de Programação por Metas. O Capítulo 3 apresenta a descrição do problema, a formulação matemática determinística elaborada para o sistema de reciclagem de resíduos de papel e inclui alguns testes computacionais com exemplares ilustrativos para um melhor entendimento do problema proposto. O Capítulo 4 apresenta testes realizados com dados reais e o Capítulo 5 apresenta o modelo sob incerteza. As considerações finais e sugestões para pesquisas futuras estão no Capítulo 6, seguido pelas referências.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão apresentada neste capítulo é uma adaptação do trabalho Defalque et al. (2021) desenvolvido por este autor em coautoria com os seus orientadores.

2.1 INTRODUÇÃO

Com base nas preocupações relacionadas a sustentabilidade e em sugestões de pesquisa expostas em Barbosa-Póvoa, Silva e Carvalho (2018), Van Engeland et al. (2020), Govindan e Soleimani (2017), Govindan, Fattahi e Keyvanshokoo (2017) e Rajeev et al. (2017), disponíveis no Apêndice A, verifica-se uma tendência crescente relacionada à recuperação e reciclagem de resíduos de papel (MIRANDA; MONTE; BLANCO, 2011). Este material gera grande quantidade de resíduos e possui grande capacidade poluente, além de ter um alto potencial para reciclagem (HOORNWEG; BHADATATA, 2012; CORMIER; MAGNAN, 1997) e os benefícios sustentáveis de sua reciclagem têm sido grandemente discutidos na literatura (MIRANDA; MONTE; BLANCO, 2011; PATI; VRAT, 2010; SCHMIDT et al., 2007; VILLANUEVA; WENZEL, 2007).

Há muitas pesquisas sobre gerenciamento de resíduos de papel, incluindo estudos relacionados a, por exemplo: avaliação do ciclo de vida; análises das diferenças dos processos de logística reversa de resíduos de papel entre os países, como a recuperação e a reciclagem; e o planejamento de redes de reciclagem considerando métodos de otimização (SAHAMIE; STINDT; NUSS, 2013).

Estudos envolvendo a avaliação do ciclo de vida de resíduos de papel são importantes por envolver os impactos de todos os processos de um produto, desde o surgimento até o final da vida de um produto, incluindo aspectos sustentáveis de gerenciamento logístico (ABNT, 2009b). A avaliação do ciclo de vida tem indicado benefícios relacionados, por exemplo, ao uso de energia e a emissões de gases de efeito estufa (HART et al., 2005; SEVIGNÉ-ITOIZ et al., 2015).

O nível de desenvolvimento do país pode estar relacionado aos processos adotados para a reciclagem. De acordo com o nível de desenvolvimento, as etapas consideradas no sistema de reciclagem podem ser diferentes entre os países (HOORNWEG; BHADATATA, 2012). Fatores como condições econômicas e geográficas podem influenciar o nível de reciclagem dos países (BERGLUND; SÖDERHOLM, 2003; VAN BEUKERING; BOUMAN, 2001). Em geral, a recuperação e o reuso de resíduos de papel dependem de fatores econômicos relacionados à população e a competitividade no mercado. Países ricos têm taxas maiores de resíduos de papel recuperados e políticas ambientais mais elaboradas do que países pobres (BERGLUND; SÖDERHOLM, 2003). O conceito de desenvolvimento de um país não é simples, como indicado por Nielsen (2011).

De acordo com Ervasti, Miranda e Kauranen (2016b), descrever o fluxo de material oriundo de uma indústria de papel não é uma tarefa fácil, já que há diferenças entre os termos e as etapas, conforme as regiões geográficas estudadas. Os autores apresentaram uma rede detalhada que engloba estágios e fluxos de materiais de várias redes analisadas.

O planejamento otimizado de uma rede de reciclagem de resíduos de papel estimula a eficiência dos processos sustentáveis, motivando a investigação de métodos quantitativos para guiar o processo de tomada de decisão. Entretanto, de acordo com Pati e Vrat (2010) e Sahamie, Stindt e Nuss (2013), há poucos estudos envolvendo o planejamento da reciclagem de resíduos de papel e métodos de otimização. Portanto, com base nas informações e em sugestões apresentadas em Sahamie, Stindt e Nuss (2013), Rajeev et al. (2017), Govindan e Soleimani (2017), Govindan, Fattahi e Keyvanshokoo (2017) e Barbosa-Póvoa, Silva e Carvalho (2018), Van Engeland et al. (2020) as próximas seções apresentarão uma análise de artigos envolvendo métodos quantitativos, otimização e sistemas de reciclagem de resíduos de papel selecionados conforme o método de pesquisa descrito a seguir.

2.2 MÉTODO UTILIZADO PARA A REVISÃO

A revisão foi conduzida por meio de uma busca eletrônica nas bases de dados Scopus (SCOPUS, 2019) e Web of Science (WEB OF SCIENCE, 2019). Para a escolha das palavras-chave usadas na busca, foram utilizados termos baseados naqueles apresentados em Ervasti, Miranda e Kauranen (2016a), Sahamie, Stindt e Nuss (2013) e algumas palavras-chave encontradas em outros artigos envolvendo gerenciamento de resíduos de papel. Foram consideradas publicações disponíveis nas bases de dados em 30 de novembro de 2019.

Primeiramente, a busca foi realizada em títulos, palavras-chave ou resumos e foram usados os seguintes termos e conectivos: *"reverse" or "closed-loop" and (paper recovery" or "waste paper" or "scrap paper" or "recovered paper" or "used paper" or "paper recycling" or "recycling paper" or "paper industry" or "recyclable paper" or "recycled paper" or "paper waste" or "cardboard")*. Os resultados foram refinados ao considerar artigos acadêmicos em inglês publicados em periódicos. Artigos publicados em outros tipos de fontes, como conferências e livros, foram excluídos. Ao final da busca, 180 artigos diferentes foram encontrados em ambas as bases de dados.

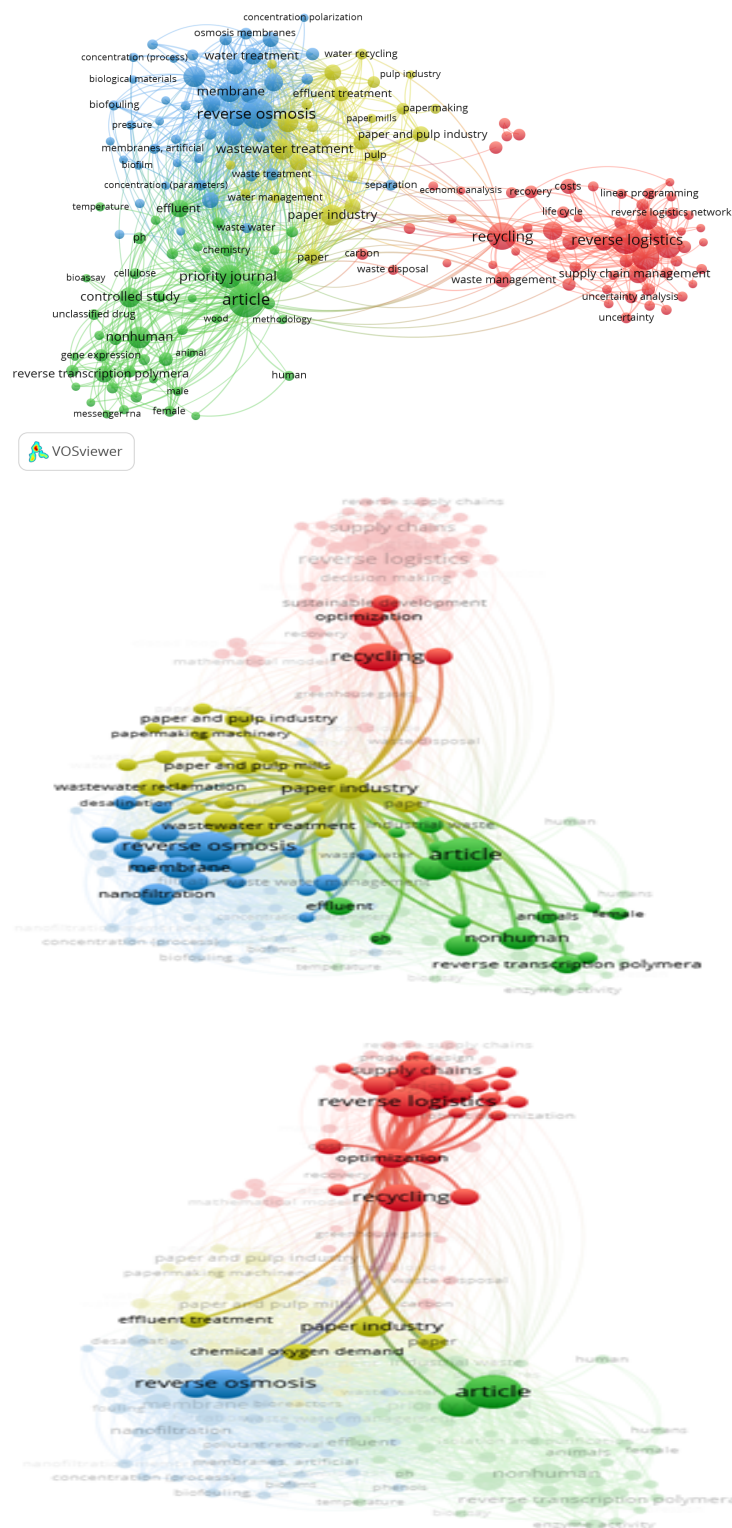
Como o objetivo desta pesquisa é analisar artigos que apresentam modelagem quantitativa para o planejamento de redes de reciclagem de resíduos de papel, considerando a otimização das etapas deste processo, os critérios a seguir foram considerados para a seleção dos artigos:

- Estudar o planejamento da rede reversa de resíduos de papel.
- Apresentar um modelo quantitativo para otimizar as etapas do sistema reverso.
- Usar métodos quantitativos como abordagem de solução para o problema (não foram considerados artigos que não apresentaram exemplos numéricos).

16 artigos foram identificados depois desta análise. Ao verificar as referências dos artigos selecionados, observou-se a existência de publicações que apresentavam termos relacionados a "resíduos de papel" apenas em uma parte específica do texto, ou seja, quando o estudo de caso é explicado (ex.: Fleischmann et al. (2001)). Portanto, esta pesquisa foi realizada novamente considerando a segunda parte da busca (depois do conectivo *"and"*) em todos os campos de pesquisa, o que inclui, por exemplo, a busca nas referências dos artigos. Assim, 689 artigos diferentes foram encontrados em ambas as bases de dados. Embora a quantidade de artigos tenha sido maior do que aquela encontrada na primeira

busca, ao considerar os critérios definidos anteriormente, somente mais 4 artigos foram adicionados aos 16 artigos selecionados. Portanto, um total de 20 artigos foram identificados depois de finalizada a análise. Neste sentido, para checar esta relação envolvendo modelagem quantitativa, reciclagem de resíduos de papel e otimização das etapas deste processo, foram analisadas a coocorrência das palavras-chave dos artigos obtidos a partir da estratégia de refinamento da segunda busca, conforme ilustrado pela Figura 3. Para a análise, foram construídos mapas de coocorrência usando VOSviewer (VAN ECK; WALTMAN, 2010) e foi considerada a contagem completa de todas as palavras-chave com um número mínimo de 10 ocorrências.

Figura 3 – Análise de coocorrência de palavras-chave de publicações encontradas nas bases de dados Scopus e Web of Science: associação geral entre os nós; nó "paper industry"; nó "optimization"



Fonte: informações obtidas das bases de dados Scopus (SCOPUS, 2019) e Web of Science (WEB OF SCIENCE, 2019) e mapas elaborados por meio do software VOSviewer (VAN ECK; WALTMAN, 2010). Adaptação publicada em Defalque et al. (2021)

Os clusters consideram similaridades entre as palavras, de acordo com a métrica aplicada (VAN ECK; WALTMAN, 2010). Desta forma, pode-se observar um cluster (em amarelo) com uma concentração de termos similares relacionados a "resíduos de papel". Foram observados que palavras relacionadas a "logística reversa" e a "métodos quantitativos" estão mais presentes em outro cluster (em vermelho).

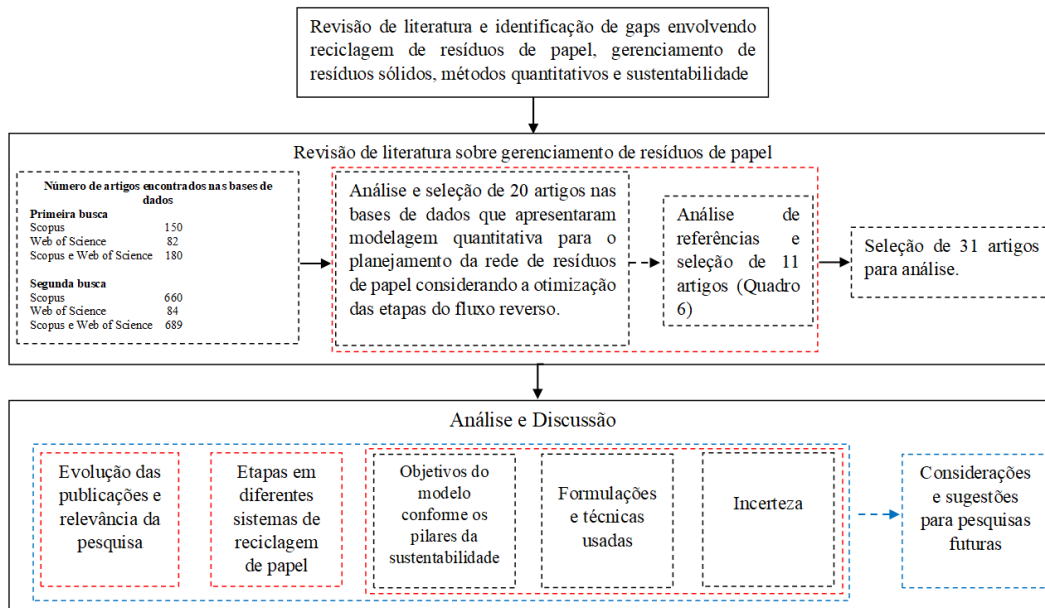
Esta análise também mostra que expressões como "*waste paper*" ou "*paper recycling*" não estão visíveis entre as associações na Figura 3, o que pode indicar a existência de poucos artigos cobrindo estes aspectos. Assim, devido ao pequeno número de artigos encontrados e, como dito anteriormente, já que algumas publicações apresentam somente termos relacionados à pesquisa em uma parte específica do texto, também foram examinadas as referências encontradas em: artigos de revisão apresentados no Quadro 20, Sahamie, Stindt e Nuss (2013) e artigos selecionados. 11 artigos foram adicionados, conforme apresentado no Quadro 2. A Figura 4 resume o método de pesquisa adotado.

Quadro 2 – Artigos selecionados de referências de outros artigos

Artigos	Referências onde os artigos foram encontrados
Bloemhof-Ruwaard et al. (1996)	Fleischmann et al. (2001), Frota Neto et al. (2008), Kara e Onut (2010b), Pati, Vrat e Kumar (2006a), Pati e Vrat (2010), Sahamie, Stindt e Nuss (2013), Zhou e Zhou (2015)
Byström e Lönnstedt (1997)	Pati e Vrat (2010), Sahamie, Stindt e Nuss (2013)
Frota Neto et al. (2008)	Tang e Zhou (2012), Sahamie, Stindt e Nuss (2013), Stindt e Sahamie (2014), Govindan, Soleimani e Kannan (2015), Safaei, Roozbeh e Paydar (2017)
Glasse e Gupta (1974)	Fleischmann et al. (2001)
Kleineidam et al. (2000)	Pati, Vrat e Kumar (2006a), Sahamie, Stindt e Nuss (2013), Zhou e Zhou (2015)
Pati, Vrat e Kumar (2008b)	Sahamie, Stindt e Nuss (2013)
Pati, Vrat e Kumar (2009)	Pati e Vrat (2010)
Pati e Vrat (2010)	Sahamie, Stindt e Nuss (2013)
Suyabatmaz, Altekin e Sahin (2014)	Zhou e Zhou (2015), Li et al. (2018)
Takamatsu, Shioya e Tsujimoto (1982)	Sahamie, Stindt e Nuss (2013)
Wang, Even Jr e Adams (1995)	Fleischmann et al. (2001), Pati, Vrat e Kumar (2007)

Fonte: elaborado pelo autor. Artigos disponíveis em rede profissional e bases de dados (Researchgate — www.researchgate.net, Google Scholar — www.scholar.google.com, Scopus — www.scopus.com and Web of Science — www.webofknowledge.com. Adaptação publicada em Defalque et al. (2021)

Figura 4 – Método de pesquisa - logística e reciclagem de resíduos de papel



Fonte: preparado pelo autor. Adaptação publicada em Defalque et al. (2021)

Esta pesquisa foi organizada com base em sugestões apresentadas em estudos encontrados na literatura sobre reciclagem de resíduos de papel, gerenciamento de resíduos sólidos, métodos quantitativos e sustentabilidade, como apresentado anteriormente. Desta forma, o próximo tópico apresentará análises de cinco categorias dos artigos selecionados: I - evolução das publicações e evolução das citações; II - etapas consideradas em diferentes sistemas de reciclagem de resíduos de papel; III - os pilares da sustentabilidade considerados nos objetivos dos modelos formulados; IV - formulações e técnicas usadas; V - análise de incerteza. Além disso, uma rede conceitual relacionando a rede de reciclagem de resíduos de papel, os estudos, e sugestões encontradas nos artigos analisados é apresentada ao final do capítulo.

2.3 ANÁLISE E DISCUSSÃO

O objetivo desta seção é analisar a evolução das publicações que apresentam modelagem quantitativa aplicada ao planejamento de redes de reciclagem de resíduos de papel. Com base nas informações e sugestões dos artigos analisados, o Quadro 3 apresenta as seguintes características dos artigos selecionados: fluxo da cadeia, somente reverso (R) ou direto e reverso (D e R); se o modelo apresenta mais de um objetivo (MO); se a incerteza (I) é considerada em algum parâmetro; e se algum método heurístico (H) ou meta-heurístico (MH) foi adotado como abordagem de solução.

Quadro 3 – Características dos artigos revisados

Artigos	Cadeia de Suprimentos		MO	I	H/MH
	D e R	R			
Bogh, Mikkelsen e Wohlk (2014)		✓		✓	✓
Bloemhof-Ruwaard et al. (1996)	✓				
Byström e Lönnstedt (1997)	✓				
Entezamina, Heidari e Rahmani (2017)		✓		✓	
Fleischmann et al. (2001)	✓				
Frota Neto et al. (2008)	✓		✓		
Georgiadis (2013)	✓			✓	
Glasse e Gupta (1974)		✓			
Kara e Onut (2010a)		✓		✓	
Kara e Onut (2010b)		✓		✓	
Kleineidam et al. (2000)	✓				
Li et al. (2018)		✓			
Pati, Vrat e Kumar (2004)		✓			
Pati, Vrat e Kumar (2006a)	✓				
Pati, Vrat e Kumar (2006b)	✓				
Pati, Vrat e Kumar (2007)	✓				
Pati, Vrat e Kumar (2008a)		✓	✓		
Pati, Vrat e Kumar (2008b)		✓			
Pati, Vrat e Kumar (2009)		✓			
Pati e Vrat (2010)	✓				
Rahmani-Ahranjani et al. (2017a)	✓		✓	✓	
Rahmani-Ahranjani et al. (2018)	✓		✓	✓	✓
Rinsatitnon et al. (2018)		✓			
Safaei, Roozbeh e Paydar (2017)	✓			✓	
Schweiger e Sahamie (2013)		✓			✓
Sharma et al. (2006)		✓		✓	
Suyabatmaz, Altekin e Sahin (2014)		✓		✓	
Takamatsu, Shioya e Tsujimoto (1982)		✓			
Tseng et al. (2019)	✓		✓		
Wang, Even Jr e Adams (1995)		✓			
Zhou e Zhou (2015)		✓			

Fonte: elaborado pelo autor. Artigos selecionados encontrados nas bases de dados pesquisadas (Scopus (SCOPUS, 2019) e Web of Science (WEB OF SCIENCE, 2019)) ou nas referências de outros artigos (Quadro 2).

Adaptação publicada em Defalque et al. (2021)

Entre os artigos analisados, aproximadamente 55% focaram somente em processos de logística reversa, 5 apresentaram mais de um objetivo, 10 consideraram algum parâmetro aleatório e somente 3 usaram algum tipo de método heurístico ou metaheurístico. A maioria dos artigos foca em apenas um aspecto, como incerteza e heurística ou programação multiobjetivo e incerteza, programação multiobjetivo e heurística ou programação multiobjetivo, incerteza e heurística. Somente um artigo

considera programação multiobjetivo e incerteza, outro relaciona incerteza e heurística e um terceiro utiliza os três aspectos estudados.

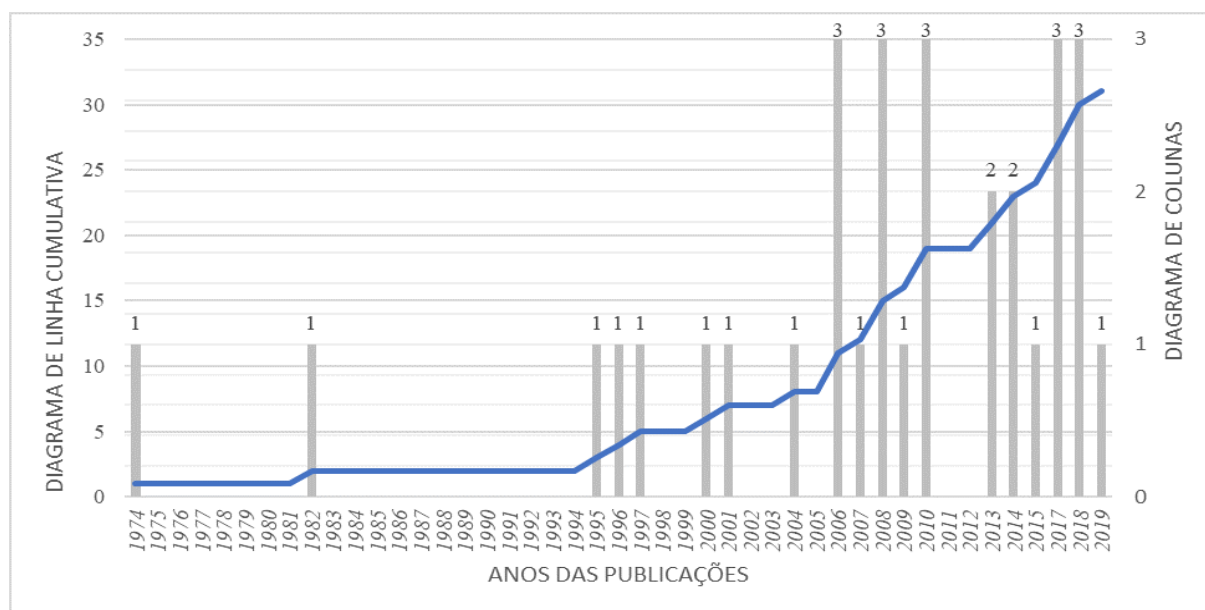
As próximas subseções apresentarão uma análise das etapas consideradas nas formulações dos sistemas de reciclagem de papel, objetivos nos modelos, conforme pilares da sustentabilidade, parâmetros aleatórios considerados e técnicas de solução usadas.

2.3.1 Evolução das publicações e das citações

Para verificar a relevância dos artigos analisados, a Figura 5 e a Figura 6 mostram a evolução das publicações e a evolução da média de citações por ano dos 31 artigos selecionados, respectivamente. Observa-se que a maioria dos artigos, aproximadamente 61%, foram publicados a partir de 2008.

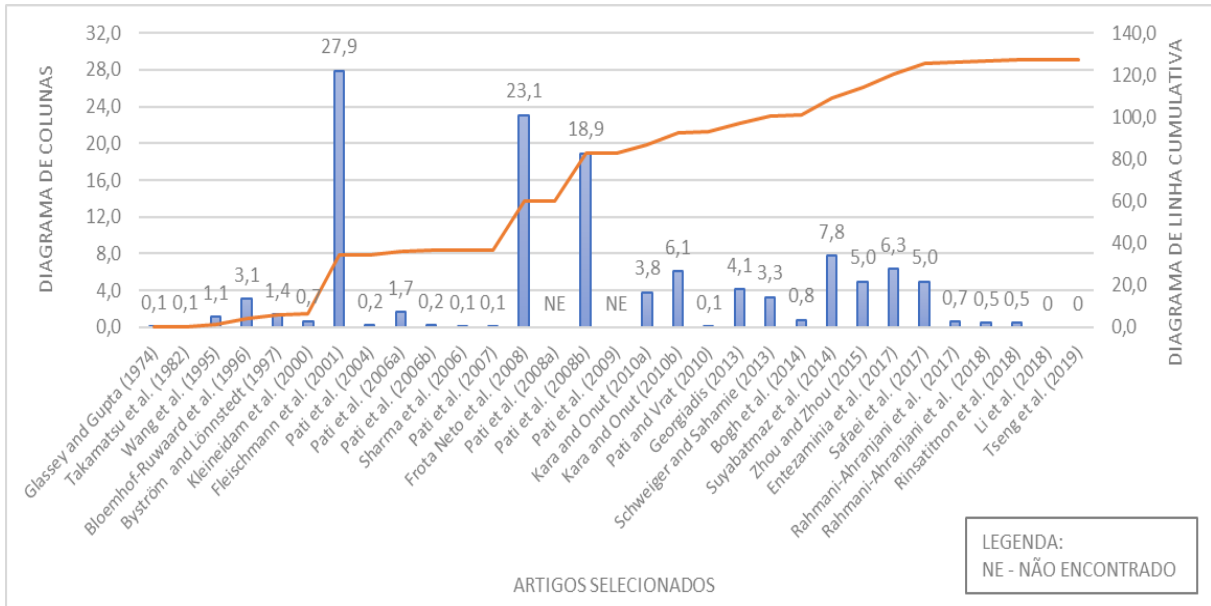
Em relação às citações, foi considerado o maior número de citações encontrado entre as duas bases. Observa-se na Figura 6 que somente um artigo publicado até 2008 destacou-se em relação à média de citações por ano (FLEISCHMANN et al., 2001). Verifica-se, ainda, que a partir de 2008, a linha cumulativa, quase uma constante desde 2001, é crescente, e alguns artigos recentes (ENTEZAMINIA; HEIDARI; RAHMANI, 2017; SAFAEI; ROOZBEH; PAYDAR, 2017) obtiveram média de citações maior do que alguns artigos mais antigos, o que enfatiza a relevância do tema. Portanto, a próxima subseção apresentará uma análise das etapas envolvidas nos processos considerados em cada estudo e uma pesquisa sobre as aplicações em diferentes países.

Figura 5 – Evolução das publicações



Fonte: artigos selecionados encontrados nas bases de dados pesquisadas (Scopus (SCOPUS, 2019) e Web of Science (WEB OF SCIENCE, 2019)) ou nas referências de outros artigos (Quadro 2). Adaptação publicada em Defalque et al. (2021)

Figura 6 – Evolução da média das citações por ano

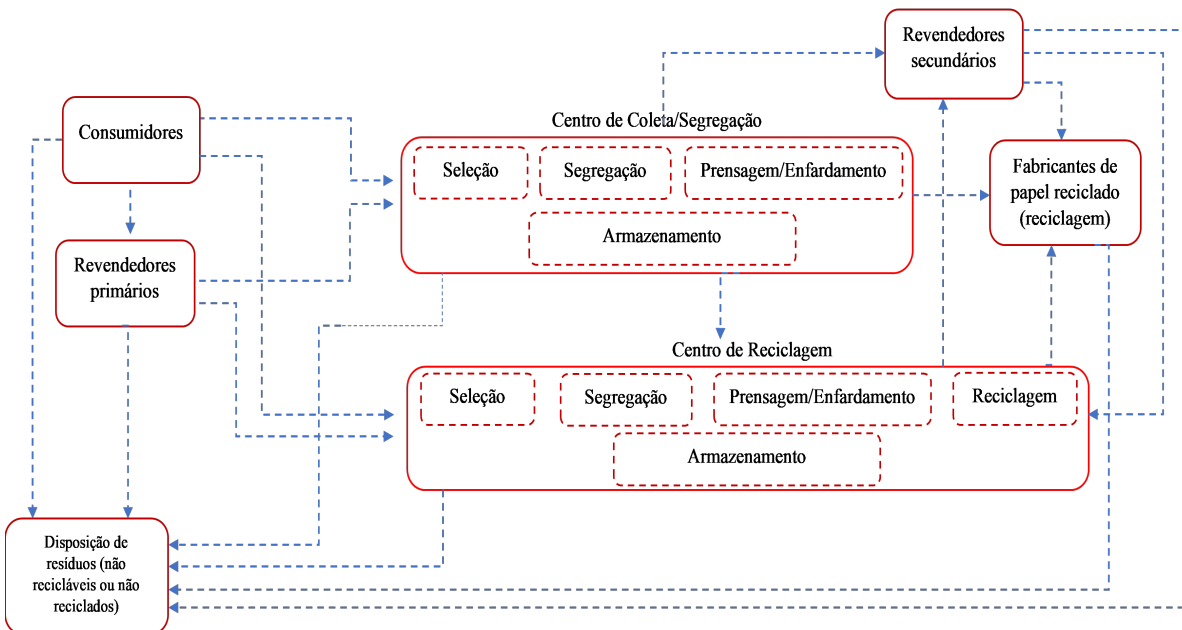


Fonte: Scopus (SCOPUS, 2019) e Web of Science (WEB OF SCIENCE, 2019). Adaptação publicada em Defalque et al. (2021)

2.3.2 Etapas em diferentes sistemas de reciclagem de papel

Com base nos estudos apresentados em Ervasti, Miranda e Kauranen (2016b) e em Govindan, Fattahi e Keyvanshokoh (2017), foram identificadas diferenças entre as etapas dos processos de reciclagem. A Figura 7 resume as principais etapas consideradas nos artigos analisados.

Figura 7 – Etapas da reciclagem de resíduos de papel



Fonte: preparado pelo autor com base nas etapas consideradas nos artigos analisados (Quadro 3). Adaptação publicada em Defalque et al. (2021)

Consumidores podem ser, por exemplo, casas, prédios e comércios (PATI; VRAT; KUMAR, 2009); ou revendedores primários (denominados "*dealers*", em alguns trabalhos da literatura (como em Pati, Vrat e Kumar (2007))), que fornecem resíduos para agentes de coleta (PATI; VRAT; KUMAR, 2007); ou uma lixeira ou área de coleta, onde o papel pode ser coletado para reciclagem (PATI; VRAT; KUMAR, 2008a). De acordo com Pati, Vrat e Kumar (2009), com o aumento da quantidade de resíduos de papel gerada, os depósitos primários são requeridos para aumentar a eficiência dos processos de coleta e armazenamento dos resíduos.

Os resíduos de papel coletados dos consumidores podem ser enviados para centros de coleta/segregação. Nestes centros, os resíduos de papel passam por um processo de triagem e o material misturado é classificado, prensado e enfardado (KARA; ONUT, 2010a). Em centros de reciclagem, o gerenciamento, a classificação e a reciclagem do material podem ser realizados. Ou seja, em centros de coleta/segregação, a produção de papel reciclado não é realizada. Fardos podem também ser adquiridos, checados, armazenados, se necessário, enfardados novamente e revendidos para fornecedores intermediários, chamados "revendedores secundários"(denominados "*suppliers*", em alguns trabalhos da literatura (ex.(PATI; VRAT; KUMAR, 2007))). Fabricantes ou fábricas de reciclagem (PATI; VRAT; KUMAR, 2008a), por outro lado, foram considerados para esta análise como instalações onde há somente a produção de material reciclado.

É possível, para centros de coleta e centros de reciclagem, vender materiais para outras instalações. A interpretação das etapas dos artigos analisados é mostrada no Quadro 4. Em Rinsatitnon et al. (2018), processos que acontecem nos centros de reciclagem, como seleção, segregação e envio para aterro são analisados para a implementação da logística reversa de resíduos de papel dentro de uma indústria de construção.

Os processos na Figura 7 estão classificados basicamente de acordo com a operação desempenhada pelas instalações: coletar resíduos relevantes e não-relevantes de fornecedores iniciais (S1), como consumidores e depósitos primários/ seleção, segregação, prensagem, enfardamento e armazenagem por fornecedores intermediários (S2), como centros de coleta/segregação e centros de reciclagem; e produção de material reciclado (S3) em instalações, como centros de reciclagem e fábricas. A Figura 8 ilustra as etapas de uma forma mais resumida do que na Figura 7, e representa o processo de uma forma mais geral.

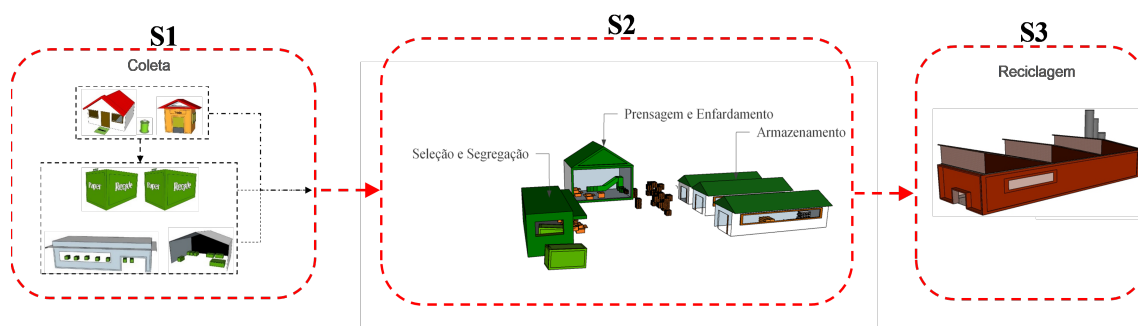
Quadro 4 – Etapas nos artigos analisados

Artigos	Etapas					
	Consumidores	Revende- dores primários	Centro de co- leta/segregação	Revende- dores se- cundários	Centro de reciclagem	Fabricante
Bogh, Mikkelsen e Wohlk (2014)	✓	✓				
Bloemhof-Ruwaard et al. (1996)	✓		✓			✓
Byström e Lönnstedt (1997)	✓				✓	
Entezamina, Heidari e Rahmani (2017)	✓		✓			✓
Fleischmann et al. (2001)	✓		✓			✓
Frota Neto et al. (2008)	✓				✓	
Georgiadis (2013)	✓	✓	✓			✓
Glasse e Gupta (1974)	✓		✓			✓
Kara e Onut (2010a)	✓		✓		✓	
Kara e Onut (2010b)	✓				✓	
Kleineidam et al. (2000)	✓	✓	✓			✓
Li et al. (2018)	✓				✓	
Pati, Vrat e Kumar (2004)	✓		✓	✓		✓
Pati, Vrat e Kumar (2006a)	✓	✓	✓	✓		✓
Pati, Vrat e Kumar (2006b)	✓	✓	✓	✓		✓
Pati, Vrat e Kumar (2007)	✓	✓	✓	✓		✓
Pati, Vrat e Kumar (2008a)	✓	✓	✓	✓		✓
Pati, Vrat e Kumar (2008b)	✓	✓	✓	✓		✓
Pati, Vrat e Kumar (2009)	✓	✓				
Pati e Vrat (2010)	✓	✓	✓	✓		✓
Rahmani-Ahranjani et al. (2017a)	✓	✓	✓	✓		✓
Rahmani-Ahranjani et al. (2018)	✓	✓	✓			✓
Safaei, Roozbeh e Paydar (2017)	✓				✓	
Schweiger e Sahamie (2013)	✓		✓			✓
Sharma et al. (2006)	✓	✓	✓	✓		✓
Suyabatmaz, Altekin e Sahin (2014)	✓		✓			✓
Takamatsu, Shioya e Tsujimoto (1982)	✓		✓			✓
Tseng et al. (2019)	✓		✓			
Wang, Even Jr e Adams (1995)	✓		✓		✓	
Zhou e Zhou (2015)	✓		✓			✓

Fonte: elaborado pelo autor. Artigos selecionados encontrados nas bases de dados pesquisadas (Scopus (SCOPUS, 2019) e Web of Science (WEB OF SCIENCE, 2019)) ou nas referências de outros artigos (Quadro 2).

Adaptação publicada em Defalque et al. (2021)

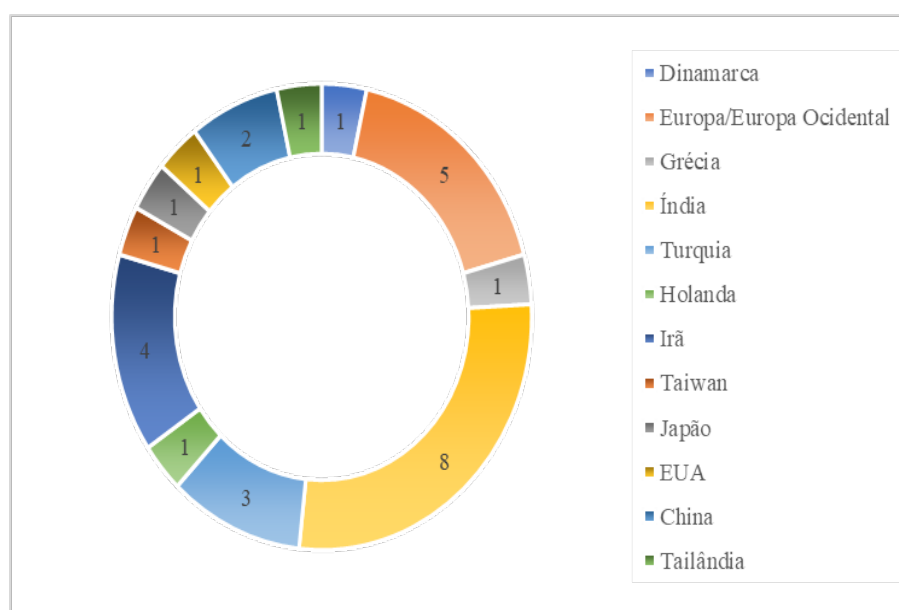
Figura 8 – Etapas resumidas da reciclagem de resíduos de papel



Fonte: preparado pelo autor com base nas etapas e operações observadas nos artigos analisados (Quadro 3). Adaptação publicada em Defalque et al. (2021)

Algumas vezes, variações nas etapas envolvidas nas formulações podem estar relacionadas à companhia, região, cidade ou país estudado. A Figura 9 apresenta aplicações reais em redes de diferentes países encontrados nos artigos pesquisados.

Figura 9 – Aplicações reais em redes de diferentes regiões



Fonte: elaborado pelo autor com base na análise dos artigos selecionados (Quadro 3). Adaptação publicada em Defalque et al. (2021)

A maioria das aplicações encontradas foram para sistemas de reciclagem da Europa e da Ásia. Somente um artigo apresentou aplicações para um sistema de reciclagem nos Estados Unidos, e não foram encontradas pesquisas considerando países da África ou da América do Sul, como o Brasil. Algumas regiões apresentadas na Figura 9 são consideradas economias em desenvolvimento (Índia, Irã, Tailândia, Taiwan, Turquia e China), de acordo com a Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento (*United Nations Conference on Trade and Development*) (UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT (UNCTADStat), 2018).

Um fator que pode influenciar a utilização e recuperação de resíduos de papel é a população (BERGLUND; SÖDERHOLM; NILSSON, 2002). A Índia tem a segunda maior população mundial (WORLD BANK, 2017) e, conseqüentemente, a quantidade de resíduos gerados leva a uma maior preocupação em relação à disposição destes resíduos. Além disso, como a matéria prima florestal usada para a produção de papel na Índia é muito limitada, as fibras recicladas são muito utilizadas para a produção de papel neste país (T&A CONSULTING, 2017). Em relação aos países europeus, como a Holanda, a reciclagem de resíduos é estimulada pelo grande número de políticas governamentais (DIJKGRAAF; GRADUS, 2014).

Diferenças entre estruturas de rede de logística reversa são comuns especialmente quando envolvem países de diferentes níveis de desenvolvimento. A disposição de resíduos, e conseqüentemente a reciclagem, depende da legislação que regula os processos envolvidos no fluxo reverso dos produtos, como os resíduos de papel (BING et al., 2016; SHARMA; VAN BEUKERING; NAG, 1997).

Em economias em desenvolvimento, a coleta em algumas cidades não é eficiente e somente parte dos resíduos gerados é coletada. Nestas regiões, setores informais de coleta resíduos operam em paralelo com setores de coleta e disposição do governo (SHARMA; VAN BEUKERING; NAG, 1997). Em geral, países menos desenvolvidos têm menores taxas de reciclagem, principalmente devido à ineficiência do sistema de coleta. A separação de resíduos na fonte aumenta a quantidade de resíduos dispostos para reciclagem e aumenta a quantidade de resíduos reciclados (SHARMA; VAN BEUKERING; NAG, 1997; ALWAEELI, 2015). Assim, a conscientização e a participação da população influencia diretamente os processos envolvidos no sistema de reciclagem.

O fluxo do material reciclado está relacionado à disponibilidade de material e tecnologias usadas para desenvolver os passos envolvidos na rede logística de reciclagem (RUTKOWSKI; RUTKOWSKI, 2017). Estas condições variam de acordo com o nível de desenvolvimento do país e influenciam diretamente os custos operacionais da rede, que pode ser afetado por diferentes tipos de materiais, renda e emprego, taxas de juros e incentivos fiscais (RUTKOWSKI; RUTKOWSKI, 2017; SHARMA; VAN BEUKERING; NAG, 1997).

Estimar os custos operacionais das etapas de uma rede de reciclagem não é uma tarefa fácil. Em centros de classificação, por exemplo, os gastos podem variar de acordo com os preços e disponibilidade da matéria prima (LEU; LIN, 1998). Uma proposta para aproximar e minimizar os custos de logística reversa pode ser encontrada em Fleischmann et al. (2004).

Principalmente devido a pressão de órgãos governamentais por uma produção mais sustentável, muitas companhias tentam alinhar a previsão de custos e eficiência na produção com a redução de impactos ambientais (CHEUNG; PACHISIA, 2015). Assim, desenvolver modelos para processos complexos como o sistema logístico de reciclagem de resíduos de papel pode melhorar o entendimento da relação entre os fatores sustentáveis da cadeia, guiando os gestores em processos de tomada de decisão (AGRAWAL; SINGH; MURTAZA, 2015), (FLEISCHMANN et al., 2004). Com base nestas informações, a próxima seção apresentará características de modelos quantitativos considerando objetivos, conforme os pilares da sustentabilidade e parâmetros usados nas formulações apresentadas, assim como técnicas de solução determinísticas e incluindo incerteza.

2.3.3 Objetivos sustentáveis, técnicas e incerteza nas formulações

O Quadro 5 apresenta uma análise dos artigos envolvendo os três pilares da sustentabilidade (econômico (E), ambiental (A) e social (S)) e os objetivos das formulações apresentadas. Somente oito artigos apresentaram objetivos econômicos e ambientais: Byström e Lönnstedt (1997), Frota Neto et al. (2008), Kleineidam et al. (2000), Pati, Vrat e Kumar (2008a), Rahmani-Ahramjani et al. (2017a), Rahmani-Ahramjani et al. (2018), Rinsatitnon et al. (2018) e Tseng et al. (2019). Destaca-se que Byström e Lönnstedt (1997) apresentaram duas análises: uma sob uma perspectiva econômica (minimização de custos) e uma outra sob uma perspectiva ambiental (minimização dos impactos ambientais). Kleineidam et al. (2000) examinaram aspectos econômicos na modelagem de cadeias de produtos sob um viés ambiental. Rinsatitnon et al. (2018) apresentaram uma análise envolvendo a evolução das taxas de remanufatura e reciclagem. Finalmente, Rahmani-Ahramjani et al. (2018) consideraram como um dos objetivos minimizar o número total de veículos usados. De acordo com os autores, a interpretação pode não ter somente um viés econômico, podendo estar relacionado a políticas da indústria de papel e à questões ambientais verdes e mais limpas.

Em relação aos objetivos sociais, há poucos estudos envolvendo tais aspectos na literatura, mais pesquisas são necessárias focando em medir impactos sociais ao longo da cadeia de suprimentos (RAJEEV et al., 2017). Neste sentido, algumas questões que podem ser otimizadas no contexto da reciclagem de papel são: riscos relacionados à saúde, reponsabilidade social, que incluem oportunidades de melhoria na carreira, e redução de acidentes de trabalho (AHLUWALIA; NEMA, 2011), (GOVINDAN; PAAM; ABTAHI, 2016), (SOLEIMANI et al., 2017).

Com base nestas informações, alguns parâmetros podem ser utilizados em trabalhos futuros sobre sistemas de reciclagem de papel, como: tempo de trabalho; índices de impactos ambientais como queimadas ou poluição; desigualdade social e custos públicos de coleta e manutenção de aterros (VAN BEUKERING; SCHOON; MANI, 1996).

A análise de formulações e técnicas usadas nos artigos selecionados é mostrada no Quadro 6. A maioria dos estudos foram conduzidos usando Programação Linear (PL) e Programação Linear Interia Mista (PLIM). Entretanto, artigos que usaram Programação Não Linear ou Programação Não Linear Inteira (PNL), Simulação, diferentes algoritmos e Heurísticas ou Metaheurísticas, como Busca Tabu e *Simulated Annealing* e Sistemas Dinâmicos (SD) também foram encontrados. Algumas definições relacionadas aos métodos acima podem ser encontradas em Arenales et al. (2006), Goldberg e Luna (2005))

Quadro 5 – Análise dos objetivos em relação aos pilares da sustentabilidade

Objetivos	Artigos	Parâmetros
E	Bogh, Mikkelsen e Wohlk (2014); Byström e Lönnstedt (1997); Entezaminia, Heidari e Rahmani (2017); Fleischmann et al. (2001); Frota Neto et al. (2008); Georgiadis (2013); Kara e Onut (2010a); Kara e Onut (2010b); Kleineidam et al. (2000); Li et al. (2018); Pati, Vrat e Kumar (2004); Pati, Vrat e Kumar (2006a); Pati, Vrat e Kumar (2006b); Pati, Vrat e Kumar (2007); Pati, Vrat e Kumar (2008b); Pati, Vrat e Kumar (2008a); Pati, Vrat e Kumar (2009); Pati e Vrat (2010); Rahmani-Ahramjani et al. (2017a); Rahmani-Ahramjani et al. (2018); Rinsatitnon et al. (2018); Safaei, Roozbeh e Paydar (2017); Schweiger e Sahamie (2013); Sharma et al. (2006); Suyabatmaz, Altekin e Sahin (2014); Takamatsu, Shioya e Tsujimoto (1982); Tseng et al. (2019); Wang, Even Jr e Adams (1995); Zhou e Zhou (2015)	Custos de atividades (ex. coleta, produção); tempo (ex. coleta, produção); lucro e receita, estoques.
A	Bloemhof-Ruwaard et al. (1996); Byström e Lönnstedt (1997); Frota Neto et al. (2008); Glassey e Gupta (1974); Kleineidam et al. (2000); Pati, Vrat e Kumar (2008a); Rahmani-Ahramjani et al. (2017a); Rahmani-Ahramjani et al. (2018); Rinsatitnon et al. (2018); Tseng et al. (2019)	Relacionado a resíduos (ex. fluxo de material, emissão de gases)

Fonte: elaborado pelo autor. Artigos selecionados encontrados nas bases de dados pesquisadas (Scopus (SCOPUS, 2019) e Web of Science (WEB OF SCIENCE, 2019)) ou nas referências de outros artigos (Quadro 2).

Adaptação publicada em Defalque et al. (2021)

Quadro 6 – Formulações e técnicas

Formulações/Técnicas	Artigos
PL	Bloemhof-Ruwaard et al. (1996); Byström e Lönnstedt (1997); Frota Neto et al. (2008); Glassey e Gupta (1974); Pati, Vrat e Kumar (2004); Pati, Vrat e Kumar (2006a); Pati, Vrat e Kumar (2006b); Pati, Vrat e Kumar (2007); Pati e Vrat (2010); Takamatsu, Shioya e Tsujimoto (1982)
PLIM	Entezaminia, Heidari e Rahmani (2017); Fleischmann et al. (2001); Kara e Onut (2010a); Kara e Onut (2010b); Pati, Vrat e Kumar (2008b); Pati, Vrat e Kumar (2008a); Rahmani-Ahranjani et al. (2017a); Safaei, Roozbeh e Paydar (2017); Schweiger e Sahamie (2013); Suyabatmaz, Altekin e Sahin (2014); Wang, Even Jr e Adams (1995); Tseng et al. (2019)
PNL	Li et al. (2018); Rahmani-Ahranjani et al. (2018); Takamatsu, Shioya e Tsujimoto (1982); Zhou e Zhou (2015)
Simulação	Bogh, Mikkelsen e Wohlk (2014); Georgiadis (2013); Kleineidam et al. (2000); Rinsatitnon et al. (2018); Sharma et al. (2006); Suyabatmaz, Altekin e Sahin (2014)
Algoritmos/Heurísticas	Bogh, Mikkelsen e Wohlk (2014); Frota Neto et al. (2008); Pati, Vrat e Kumar (2009); Schweiger e Sahamie (2013); Rahmani-Ahranjani et al. (2018)
SD	Georgiadis (2013); Kleineidam et al. (2000); Rinsatitnon et al. (2018)

Fonte: elaborado pelo autor. Artigos selecionados encontrados nas bases de dados pesquisadas (Scopus (SCOPUS, 2019) e Web of Science (WEB OF SCIENCE, 2019)) ou nas referências de outros artigos (Quadro 2). Adaptação publicada em Defalque et al. (2021)

Os métodos usados por Bogh, Mikkelsen e Wohlk (2014), Georgiadis (2013), Kleineidam et al. (2000), Schweiger e Sahamie (2013), Suyabatmaz, Altekin e Sahin (2014) e Takamatsu, Shioya e Tsujimoto (1982) merecem destaque devido às combinações utilizadas: um algoritmo combinado com a metaheurística *Simulated Annealing* (BOGH; MIKKELSEN; WOHLK, 2014); simulação combinada com teoria do controle e abordagens não lineares (GEORGIADIS, 2013; KLEINEIDAM et al., 2000); PLIM combinada com a metaheurística Busca Tabu híbrida (SCHWEIGER; SAHAMIE, 2013); um modelo híbrido que combina PLIM e Simulação (SUYABATMAZ; ALTEKIN; SAHIN, 2014); e análises linear e não linear (TAKAMATSU; SHIOYA; TSUJIMOTO, 1982). Vale a pena notar também que outras abordagens envolvendo, por exemplo, aspectos não lineares ou diferentes análises foram também identificadas em alguns artigos estudados (FROTA NETO et al., 2008; GEORGIADIS, 2013; KLEINEIDAM et al., 2000).

O Quadro 7 apresenta características envolvendo parâmetros aleatórios e os métodos usados para lidar com incerteza. Dos 31 artigos investigados, 10 usaram alguma técnica para lidar com incerteza. Dos 10, somente 2 combinaram no mínimo 2 técnicas (KARA; ONUT, 2010b; RAHMANI-AHRANJANI et al., 2018). Entre os parâmetros aleatórios considerados, demanda de empresas recicladoras e parâmetros relacionados à quantidade de resíduos foram usados frequentemente.

Em redes de logística reversa, as taxas de retorno de resíduos, atrasos na produção, qualidade,

tempo de recebimento dos resíduos e a conscientização do cliente no retorno dos materiais usados são parâmetros que podem ser considerados não determinísticos, especialmente em estudos envolvendo questões de sustentabilidade (GOVINDAN; SOLEIMANI; KANNAN, 2015).

Quadro 7 – Técnicas de incerteza usadas nos artigos

Técnicas de incerteza	Artigos	Parâmetros aleatórios
Programação estocástica	Bogh, Mikkelsen e Wohlk (2014), Kara e Onut (2010a), Kara e Onut (2010b), Rahmani-Ahramjani et al. (2018)	Demanda, entrega, coleta, quantidade disponível de resíduos para o fluxo reverso
Otimização robusta	Entezaminia, Heidari e Rahmani (2017), Kara e Onut (2010b), Safaei, Roozbeh e Paydar (2017), Rahmani-Ahramjani et al. (2018)	Custos, demanda, entrega, coleta, quantidade disponível de resíduos
Simulação estocástica	Georgiadis (2013), Sharma et al. (2006), Suyabatmaz, Altekin e Sahin (2014)	Demanda, quantidade disponível de resíduos
Fuzzy	Rahmani-Ahramjani et al. (2017a), Rahmani-Ahramjani et al. (2018)	Custos, entrega, coleta, resíduos para reciclagem, escores ambientais

Fonte: elaborado pelo autor. Artigos selecionados encontrados nas bases de dados pesquisadas (Scopus (SCOPUS, 2019) e Web of Science (WEB OF SCIENCE, 2019)) ou nas referências de outros artigos (Quadro 2). Adaptação publicada em Defalque et al. (2021)

Modelos quantitativos podem contribuir para a otimização do processo de tomada de decisão (DEKKER et al., 2004), e aspectos relacionados a estas contribuições foram destacados em alguns dos artigos considerados. Wang, Even Jr e Adams (1995) afirmaram que o modelo quantitativo proposto pode ser adaptado por companhias para ajudar os processos de tomada de decisão relacionados a alocação ou transporte de materiais. Byström e Lönnstedt (1997) afirmaram que as análises quantitativas apresentadas podem ser usadas em vez de julgamentos qualitativos. De acordo com Pati, Vrat e Kumar (2004), o modelo proposto pode ajudar companhias a decidirem se a aquisição de papel reciclado é economicamente viável para produzir novos materiais, levando a escolha de estratégias para o gerenciamento de operações (PATI; VRAT, 2010).

2.3.4 Rede conceitual ligando aspectos quantitativos e considerações em relação a sugestões para pesquisas futuras

Como discutido anteriormente, as etapas do fluxo reverso de reciclagem de resíduos de papel são influenciadas por fatores como região geográfica, legislação e nível de desenvolvimento do país. Por esta razão, pesquisas geralmente envolvem contextos locais. Entretanto, ajustes considerando informações extras como operações de importação e exportações, regulações do governo e questões ambientais e sociais podem ser considerados. Uma análise de redes de reciclagem de papel envolvendo estágios e fluxo de material pode também ser encontrada em Ervasti, Miranda e Kauranen (2016b),

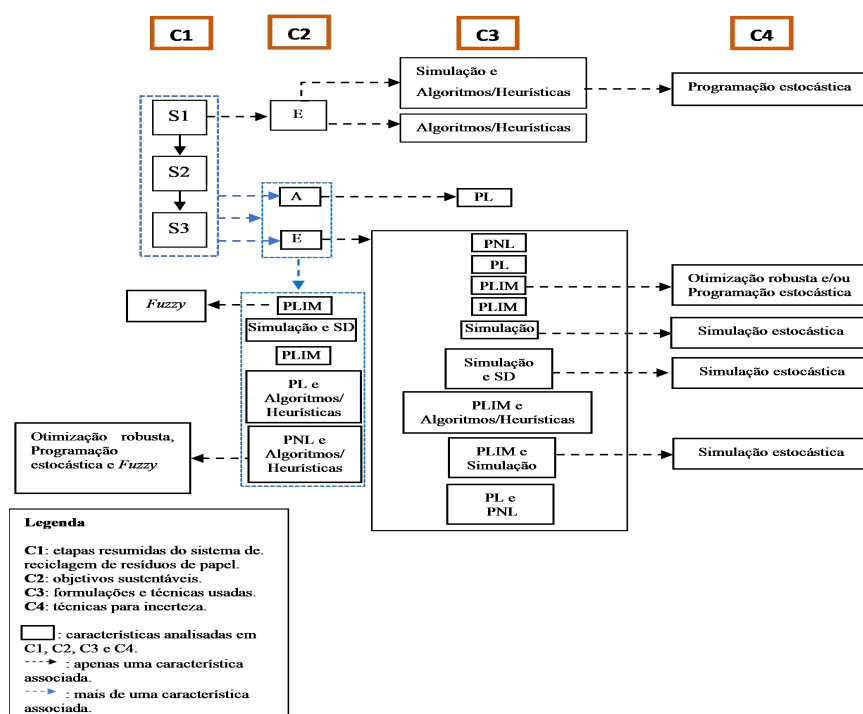
e estudos mais genéricos, além de propostas para redes reversas, incluindo outros tipos de resíduos, podem ser encontradas, por exemplo, em Alumur et al. (2012), Feitó-Cespón et al. (2017), Fleischmann et al. (1997) e Xu et al. (2017).

Neste contexto, uma sugestão para pesquisa futura envolve formulações de uma proposta regional cujo conceito pode ser expandido a um nível nacional com a inclusão de informações adicionais (WANG; Even Jr; ADAMS, 1995). Em relação aos fatores apontados inicialmente, estudos envolvendo o cumprimento da legislação por meio de parâmetros incluídos nos modelos (KLEINEIDAM et al., 2000) e pesquisas envolvendo a modelagem quantitativa de redes de reciclagem de resíduos de papel em países com diferentes níveis de desenvolvimento podem ser considerados. Além disso, somente 12 regiões tiveram pesquisas aplicadas ao contexto estudado. Abordagens quantitativas aplicadas a situações vivenciadas por países da América do Sul e África, por exemplo, são boas oportunidades de pesquisa.

Da mesma forma, analisar custos de produtos em sistemas reversos geralmente não é uma tarefa fácil, e o planejamento otimizado da rede pode impactar a sustentabilidade dos valores de recuperação e reciclagem de resíduos (AGRAWAL; SINGH; MURTAZA, 2015; FLEISCHMANN et al., 2000). Neste cenário de incerteza, tecnologias da informação podem guiar decisões por meio de pesquisas que contribuem para o alinhamento de aspectos econômicos e ambientais (FLEISCHMANN et al., 1997).

Os principais aspectos analisados neste estudo estão relacionados na Figura 10. A coluna C1 apresenta as etapas descritas na Figura 8; C2 apresenta os objetivos de acordo com os pilares da sustentabilidade, conforme Quadro 5; C3 representa as técnicas usadas nas formulações, conforme Quadro 6; e C4 considera as técnicas de incerteza descritas no Quadro 7.

Figura 10 – Rede conceitual para relacionar a rede de reciclagem de resíduos de papel com os principais aspectos estudados



Fonte: elaborado pelo autor com base na análise dos artigos selecionados (Quadro 3). Adaptação publicada em Defalque et al. (2021)

O transporte de resíduos é um processo logístico que envolve as três etapas do sistema de reciclagem (S1, S2 e S3) e bastante discutido na literatura por estar relacionado a fatores como: minimização de custos de transporte, redução de emissões de gases poluentes e maximização da quantidade de resíduos adequados para reciclagem. Algumas aplicações com estes objetivos incluem a disposição de resíduos em containers, abertura e fechamento de instalações para armazenamento de materiais e métodos de transporte e disposição de resíduos para otimizar processos.

Outros processos logísticos que podem ser considerados *gaps* em sistemas de reciclagem pertencem aos fornecedores intermediários e às instalações de reciclagem. A segregação, prensagem, efardamento e armazenamento estão diretamente relacionados: à quantidade de material disponível para reciclagem, às instalações e equipamentos usados no processo, ao trabalho envolvido, aos custos, à demanda, nível de satisfação do cliente, entre outros aspectos. Neste contexto, os artigos revisados somente cobriram a primeira etapa (S1) ou as três etapas simultaneamente.

Não foram encontrados na pesquisa realizada, trabalhos que focaram somente nos processos logísticos de S2 ou de S3, e apenas dois combinaram duas etapas (isto é, S1 e S2, S1 e S3 ou S2 e S3). Objetivos ambientais e sociais não foram observados em trabalhos que consideraram somente a etapa S1, cujo foco foram as questões econômicas. Ainda neste caso, em relação às formulações e técnicas empregadas, não foram identificados trabalhos incluindo PL, PLIM, PNL e SD ou combinações como: PLIM, PL ou PNL e simulação; PLIM, PL ou PNL e SD; PLIM, PL ou PNL e heurísticas; ou simulação e SD. Incerteza, também, não foi muito frequente, já que somente o uso de programação estocástica

foi identificado.

Como destacado anteriormente, situações envolvendo logística reversa, como a reciclagem de resíduos de papel, geralmente envolve ambientes incertos. Assim, a quantidade coletada de resíduos varia conforme a quantidade gerada pelos fornecedores iniciais e também depende da correta disposição dos resíduos, já que a contaminação pode impedir a reciclagem. A demanda dos fornecedores intermediários e de centros/fábricas de reciclagem geralmente sofre variações durante o ano, além do estoque do material e também os índices ambientais relacionados à reciclagem.

Portanto, o uso de parâmetros aleatórios e/ou combinações das formulações mencionadas no parágrafo anterior além de técnicas para lidar com incerteza, são boas oportunidades para pesquisas futuras. Informações e comparações entre algumas técnicas para considerar incerteza podem ser encontradas, por exemplo, em Alem (2011), Alem e Morabito (2015) e Silva e Marins (2015).

Os trabalhos que combinaram S1, S2 e S3 apresentaram objetivos com fatores econômicos e ambientais e não foram encontrados artigos envolvendo questões sociais. Além disso, poucos artigos endereçavam a no mínimo dois objetivos relacionados a diferentes pilares da sustentabilidade. Verificou-se, ainda, que combinações ou comparações entre técnicas foram pouco empregadas. Portanto, estudos considerando diferentes técnicas para lidar com incerteza, comparações, combinações assim como modelos não lineares são boas oportunidades de pesquisa.

Técnicas como simulação, heurísticas/metaheurísticas e SD também foram pouco discutidas nos artigos estudados. Abordagens heurísticas por exemplo, são bastante usadas em estudos envolvendo o planejamento da cadeia, para problemas de grande porte (DEMIREL et al., 2014), (GOVINDAN; PAAM; ABTAHI, 2016).

Algumas sugestões para pesquisas futuras, como a consideração de incerteza, foram mais frequentemente verificadas nos artigos selecionados (ENTEZAMINIA; HEIDARI; RAHMANI, 2017; PATI; VRAT; KUMAR, 2008a; PATI; VRAT; KUMAR, 2006a; SAFAEI; ROOZBEH; PAYDAR, 2017; SCHWEIGER; SAHAMIE, 2013). Os estudos sugeriram considerar parâmetros aleatórios ou usar novas abordagens, em se tratando de trabalhos cuja incerteza já foi considerada. O uso de heurísticas/metaheurísticas também foi sugerido em alguns trabalhos (KARA; ONUT, 2010a; KARA; ONUT, 2010b).

Em resumo, os artigos mostraram muitas diferenças e especificidades nas etapas dos processos de reciclagem e nos objetivos, formulações, técnicas e parâmetros usados na modelagem. Poucas aplicações foram encontradas, sendo a maioria em países da Ásia, e Europa. Oportunidades de pesquisa envolvendo fatores econômicos, ambientais e sociais juntamente com técnicas para lidar com incerteza e combinações de métodos e técnicas foram identificados.

Portanto, com base na revisão apresentada neste capítulo e em capítulos anteriores, o próximo Capítulo apresentará uma formulação construída com foco nos centros intermediários. Primeiramente, foi elaborado um modelo determinístico de programação linear inteira mista multiobjetivo que otimiza aspectos econômicos e ambientais em relação ao fluxo dos resíduos de papel, desde os pontos de coleta até a entrega dos fardos. Primeiramente, foi utilizada a Programação por Metas Lexicográfica para resolver o modelo multiobjetivo. Em uma segunda análise, foi considerada a Programação por Metas Ponderada. O modelo foi aplicado a uma empresa brasileira do ramo.

Para um melhor entendimento das técnicas que serão utilizadas nas modelagens, uma revisão de modelos de Programação por Metas é apresentada nos Apêndices B e C.

3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E MODELAGEM MATEMÁTICA

As formulações determinística e sob incerteza, análise de cenários e discussões envolvendo sustentabilidade apresentadas nesta tese foram publicadas, de forma adaptada, em Defalque, Silva e Marins (2021).

3.1 LOGÍSTICA DE RESÍDUOS DE PAPEL NO BRASIL

Conforme apresentado no Capítulo 2, os processos do sistema logístico para a reciclagem de resíduos de papel envolvem basicamente: a coleta de materiais; a seleção e segregação de materiais recicláveis; descarte de materiais irrelevantes; o estoque de materiais relevantes não-enfardados; a prensagem e o enfardamento de materiais relevantes; o estoque de materiais enfardados; a venda de fardos; e a reciclagem.

Observou-se ainda que as formulações apresentadas na literatura podem variar conforme a companhia, a região, a cidade ou o país estudado, e que países em desenvolvimento podem possuir diferenças na estrutura da rede logística.

O Brasil, por exemplo, apesar de possuir políticas governamentais para incentivar o desenvolvimento de organizações formais para a coleta de resíduos (BRASIL, 2010), apresenta a maioria dos materiais coletados para reciclagem oriunda de coleta informal (GUTBERLET, 2015). Verifica-se, então, a importância dos centros intermediários para organização e comercialização do material coletado para a reciclagem.

Neste sentido, o setor aparista é um ramo do comércio que faz o papel de intermediador no processo logístico de reciclagem de aparas de papel. Nestes centros, o material coletado, ou entregue pelos consumidores, é conferido e segue as etapas de classificação, segregação, enfardamento e estocagem para posterior comercialização, conforme visto no Capítulo 2.

No Brasil, este termo "aparas de papel" é utilizado quando se faz referência ao material resultante da classificação do resíduo de papel, que ocorre após a coleta do material e transporte aos centros intermediários ou setores aparistas (ANGUTI ESTATÍSTICA, 2018).

As aparas podem ser consideradas de pré ou pós-consumo. São ditas de pré-consumo, quando são resultantes de sobras do processo de produção de papel, ou seja, que ainda não foram utilizados pelo consumidor. As aparas consideradas de pós-consumo são os resíduos de material já consumidos e descartados pelo consumidor (ANGUTI ESTATÍSTICA, 2018).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), as aparas de papel e papelão ondulado podem ser classificadas conforme apresentado em ABNT (2009a). Há um percentual limite para a presença de teor de umidade e materiais impróprios que incluem os proibitivos e/ou impurezas, que comprometem o processo de fabricação/produção ABNT (2007). É considerado impureza: "todo material que não pode ser transformado em papéis e que pode comprometer o processo de produção. É possível ser retirado no processo de fabricação. Por exemplo: metal, plástico, vidro, pedra, areia"(ABNT, 2009a). Em se tratando do material proibitivo, é "todo material que compromete

a qualidade do papel produzido e não é possível de ser retirado no processo de fabricação específico de um determinado tipo de papel. Por exemplo: papel parafinado, betuminado, papéis higiênicos usados e fitilhos (internos no fardo)"(ABNT, 2009a).

No Brasil, segundo o relatório de 2018 elaborado pela Anguti Estatística (2018), "o aparista busca o material nas mais diversas fontes assumindo todos os custos da logística das aparas e, em tendência recente, também está assumindo os custos da entrega do material às fábricas recicladoras". De uma forma geral, os segmentos que fornecem material para o setor aparista envolvem: Gráficas e cartonagens (25%); Comércio (25%); Ferros-velhos (33%); Cooperativas e catadores (17%) (ANGUTI ESTATÍSTICA, 2018).

Ainda segundo Anguti Estatística (2018), as empresas que comercializam aparas de papel podem ser classificadas como: grupo de pequenas empresas, que manuseiam até 1.000t/mês; grupo de médias empresas, que manuseiam de 1.000t/mês à 3.000t/mês; e o grupo de grandes empresas, que manuseiam mais de 3.000t/mês (ANGUTI ESTATÍSTICA, 2018). Em 2018, a coleta de aparas pelo setor bateu o recorde de 5,09 milhões de toneladas, sendo 2,4% maior do que em 2017 (ANGUTI ESTATÍSTICA, 2018).

Segundo o relatório da Anguti Estatística (2018), há dois tipos de prensas enfardadeiras: as verticais e as horizontais. Em geral, as prensas verticais possuem capacidade para a produção de fardos de até 400 kg. Já, as horizontais podem produzir fardos de aproximadamente 1200 kg. As prensas verticais podem ser encontradas, por exemplo, em cooperativas e pequenos aparistas, que utilizam esta ferramenta para facilitar a comercialização com outros aparistas maiores ou, até mesmo, com fábricas de papel reciclado (ANGUTI ESTATÍSTICA, 2018). Há, também, alguns aparistas que mantêm prensas verticais nos estabelecimentos para diminuir os custos de transporte. Os pequenos fardos que chegam à empresa aparista são desmanchados e segregados, sendo transformados em fardos maiores com a utilização das prensas horizontais, de forma a atender a legislação de comercialização de fardos ou a especificação do consumidor (ANGUTI ESTATÍSTICA, 2018).

3.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Para um melhor entendimento do sistema logístico de reciclagem de resíduos de papel, foram realizadas visitas a uma cooperativa e a uma empresa de grande porte do setor aparista, chamada nesta tese de empresa A. Ambas coletam e recebem materiais dos fornecedores, fazem a seleção, a segregação, a prensagem, o enfardamento, o armazenamento e a comercialização de materiais. A cooperativa possui apenas uma prensa vertical, já a empresa A uma prensa horizontal viabilizando a alta compactação dos fardos (ANGUTI ESTATÍSTICA, 2018). A cooperativa movimenta um fluxo pequeno de materiais se comparado ao fluxo da empresa A, e recebe auxílio da prefeitura da cidade onde está localizada e de outras empresas aparistas, em relação a, por exemplo, questões tributárias, de manutenção de equipamentos, transporte, compra e venda de materiais e pagamento de funcionários que, em sua maioria, não possuem contratos formais. Tanto a cooperativa como a empresa A comercializam além das aparas de papel outros tipos de materiais, como plástico e ferro. Entretanto, na empresa A, o foco é o comércio de aparas, responsável por mais de 70% do faturamento. Desta forma, alguns dados reais foram fornecidos pela empresa e utilizados nos testes.

Conforme verificado nas visitas, em entrevistas com os gestores e em Anguti Estatística (2018), em centros intermediários os resíduos de papel podem chegar como material solto ou em fardos de baixa compactação. Podem existir pontos de fornecimento de material considerados fixos, cuja coleta é realizada com certa periodicidade, e fornecedores aleatórios, que entregam o material na empresa ou que, por meio de contato telefônico, por exemplo, solicitam a coleta do material disponível. Em geral, esta coleta de material avulso é realizada no próprio dia do contato ou agendada para o dia seguinte, para que a venda não seja perdida, já que muitos fornecedores acabam acumulando material sem possuírem espaço próprio para armazenamento. Quando há possibilidade, caçambas são disponibilizadas pelo centro intermediário para alguns estabelecimentos com o intuito de facilitar a coleta do material, conforme apontado em Anguti Estatística (2018).

Observou-se que as quantidades disponíveis para coleta, os preços de compra e venda das aparas, além da demanda de materiais podem variar conforme a oscilação do mercado (ANGUTI ESTATÍSTICA, 2018). Por exemplo, nos meses de novembro e dezembro a quantidade disponível para coleta geralmente é baixa se comparada à quantidade disponível em janeiro, com o término das festas.

Geralmente, o material que chega na empresa em um dia é verificado, segregado e enfardado no mesmo dia, podendo restar, com menor frequência, algum material para ser enfardado no dia seguinte. Verificou-se, ainda, que podem existir materiais que necessitam de mais tempo para serem conferidos. Isto acontece, por exemplo, quando uma grande quantidade de material chega compactada e deve ser conferida cuidadosamente para verificar a presença de materiais impróprios misturados. Ao conferir o material recebido e verificar a existência de material não-relevante para reciclagem, o valor referente a este material, que seria pago pela empresa ao fornecedor, é descontado, conforme especificações da ABNT (2007).

Verificou-se, portanto, que para o setor aparista, a quantidade comercializada, e, assim, o lucro, depende não só da quantidade coletada de material, mas da quantidade de material relevante coletada, já que resíduos que sofrem algum tipo de contaminação, por exemplo ao serem misturados com resíduos orgânicos, muitas vezes não servem mais para a reciclagem e devem ser descartados. Desta forma, o bom planejamento de uma rede de reciclagem de resíduos de papel guia os processos de forma eficiente, estando diretamente relacionado a fatores sustentáveis conflitantes, tais como: a minimização de custos, a maximização das taxas de reciclagem (por meio do aumento da quantidade de materiais relevantes coletados e comercializados), e, até mesmo, a possibilidade de aumento do número de empregos e da renda do trabalhador, provenientes do bom gerenciamento dos processos logísticos da empresa.

Assim, tendo em vista os problemas logísticos observados, o objetivo deste trabalho é elaborar um modelo matemático que visa otimizar os processos logísticos destes centros intermediários de comercialização de aparas de papel. Para isto, algumas considerações iniciais para a elaboração do modelo estão apresentadas a seguir.

Considerações iniciais:

- Foi elaborado um modelo de Programação Linear Inteira Mista Multiobjetivo (definições podem ser encontradas em (ARENALES et al., 2006; GOLDBARG; LUNA, 2005)) que otimiza aspectos

econômicos e ambientais de um centro intermediário em relação ao fluxo das aparas, desde os pontos de coleta até a entrega dos fardos.

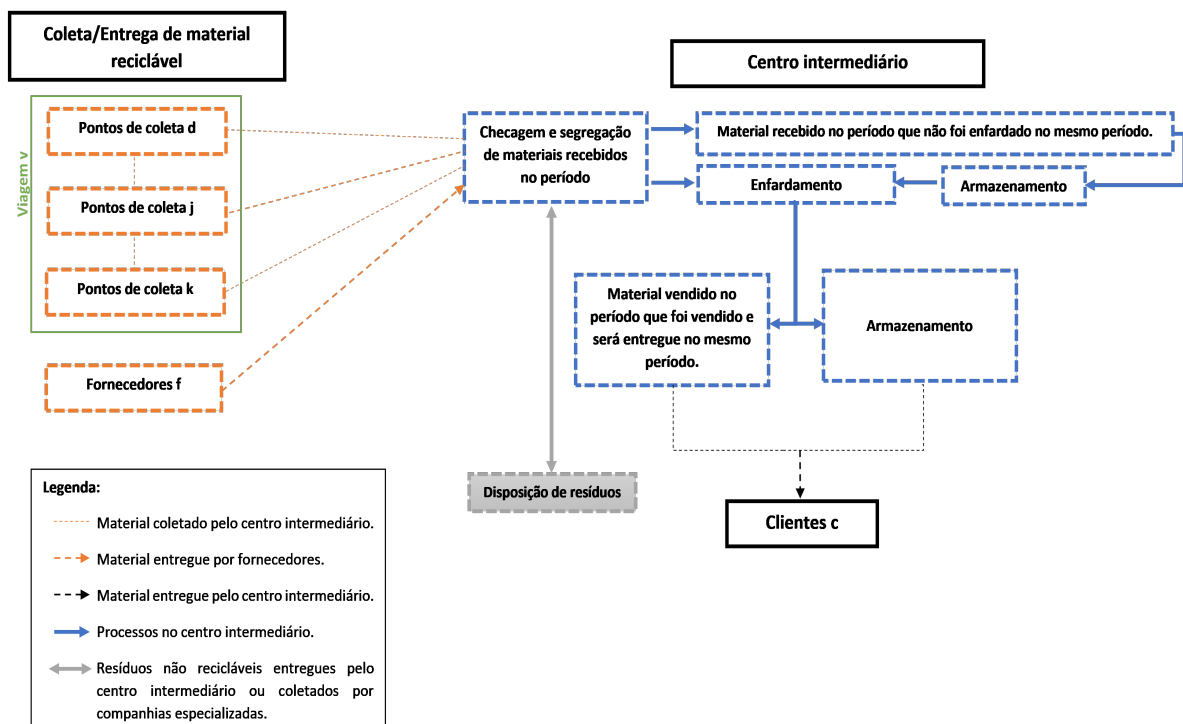
- As quantidades, localização e capacidades dos pontos de coleta são conhecidas e pré-definidas.
- A localização e capacidades da empresa são conhecidas.
- Como verificou-se que, em geral, o percentual de material não segregado diariamente é pequeno, foi considerado que todo material coletado no período será separado em resíduos relevantes e irrelevantes no mesmo período, e todo material irrelevante do período será levado para aterros sanitários no mesmo período.
- As perdas ocorridas no processo de enfardamento são consideradas desprezáveis. Ou seja, se 1 tonelada de material relevante do tipo i é obtida após a etapa de classificação, 1 tonelada deste mesmo tipo de resíduo poderá ser vendida em forma de fardos.
- O roteamento dos veículos (TOTH; VIGO, 2002) é considerado apenas na fase de coleta no modelo. Para a entrega dos fardos, foi considerado apenas o custo médio total, já que em algumas empresas, foi observado que a entrega ocorre de forma terceirizada.
- A etapa de coleta de materiais é formulada considerando-se o roteamento de veículos com diferentes capacidades, e a possibilidade de múltiplas viagens em cada período.
- A formulação considera ainda a possibilidade de armazenamento de material nos pontos de coleta, quando possível. Isto possibilita que haja o acúmulo de um limite mínimo de material para posterior coleta do centro intermediário.
- Foi considerado ainda além da meta de atendimento à demanda de fardos ao longo do horizonte de planejamento, metas que possibilitam que o atendimento à demanda possa ser adiantado ou atrasado, conforme a variação necessária dos cenários e o acordo com o cliente.
- A Programação por Metas Lexicográfica e a Programação por Metas Ponderada foram utilizadas como abordagens para o modelo (CHARNES; COOPER; FERGUSON, 1955; CHARNES; COOPER, 1961; ROMERO, 2004), pois conforme informações disponíveis no Apêndice B, têm sido bastante empregadas em problemas de gerenciamento (COLAPINTO; JAYARAMAN; MARSIGLIO, 2017). A Programação por Metas Ponderada foi empregada juntamente com a normalização da soma (TAMIZ; JONES; ROMERO, 1998), já que há unidades de medidas diferentes entre os objetivos. Quando os valores dos coeficientes "do lado esquerdo" da restrição são pequenos se comparados aos valores das metas ("lado direito da restrição"), por apresentar divisores maiores, ao utilizar o Método de Normalização da Soma a possibilidade de distorções nos resultados é menor do que com o método de Normalização Euclidiana (TAMIZ; JONES; EL-DARZI, 1995; TAMIZ; JONES; ROMERO, 1998).
- Não foi considerado tempo (horas de trabalho) dentro do período, apenas a capacidade operacional. Desta forma, todo o material relevante recebido e/ou coletado no período poderá ser

entregue no mesmo período (o que foi observado na empresa de grande porte visitada, que, quando necessário, trabalha com revezamento dos funcionários em diferentes turnos de trabalho).

- Alguns objetivos e restrições do modelo foram baseados em Anghinolfi et al. (2013), Couto et al. (2017), Defalque, Rangel e Ferreira (2011), Desrochers e Laporte (1991), Miller, Tucker e Zemlin (1960), Pati, Vrat e Kumar (2008a), Toth e Vigo (2002).
- A estrutura do modelo é multiprodutos, multiestapas e multiperíodos, conforme descrito no Quadro 23.

A Figura 11 ilustra o fluxo representado pelo modelo proposto. Os resíduos podem ser coletados pelos centros intermediários (coleta/segregação) ou entregues pelos fornecedores de resíduos. Em seguida, os centros intermediários irão conferir e segregar o material. Conforme descrito anteriormente, resíduos irrelevantes (umidade ou materiais impróprios) terão a destinação apropriada no período, resíduos relevantes serão enfardados e os fardos vendidos. Foram considerados dois tipos de materiais que podem ser estocados: materiais conferidos e segregados que não foram enfardados no período (menos comum) e fardos.

Figura 11 – Etapas do processo logístico de resíduos de papel consideradas na modelagem



Fonte: preparado pelo autor baseado em Anguti Estatística (2018) e em dados reais. Adaptação publicada em Defalque, Silva e Marins (2021)

Os objetivos do modelo envolvem:

- Maximizar a quantidade coletada de resíduos:

- maximizar a quantidade coletada de resíduos ao longo do horizonte de planejamento (baseado em Pati, Vrat e Kumar (2008a));
 - maximizar a quantidade coletada de resíduos por veículo, por viagem, por período (se o veículo foi usado);
 - maximizar a quantidade coletada de resíduos em cada ponto de coleta, por veículo, por viagem, por período (se houve a coleta no respectivo ponto de coleta).
- Minimizar a distância percorrida por período.
 - Maximizar a produção e venda de fardos:
 - maximizar a produção e venda de fardos por período;
 - maximizar o atendimento à demanda de fardos de cada resíduo , para cada cliente, no período;
 - maximizar o atendimento à demanda de fardos de cada resíduo ao longo do horizonte de planejamento.
 - Minimizar os custos totais ao longo do horizonte de planejamento (estoque, aquisição de material, disposição de resíduos não-relevantes e transporte) (baseado em Pati, Vrat e Kumar (2008a))

3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Nesta seção será apresentado um modelo multiobjetivo para o sistema logístico de reciclagem de resíduos de papel com foco na otimização das etapas dos centros intermediários.

3.3.1 Modelo Matemático Proposto

Considere os seguintes conjuntos e índices definidos para descrever o modelo (adaptado de Anghinolfi et al. (2013), Pati, Vrat e Kumar (2008a)):

I conjunto de materiais disponíveis para a coleta, com $i \in I$.

D, J e K conjuntos de nós da rede (pontos de coletas), com $d \in D, j \in J$ e $k \in K$.

em que:

$d_0 \in D$ é o centro intermediário, ou seja, o ponto de saída e de retorno dos veículos que farão a coleta.

B conjunto de veículos que farão a coleta, com $b \in B$.

V conjunto de viagens, com $v \in V$.

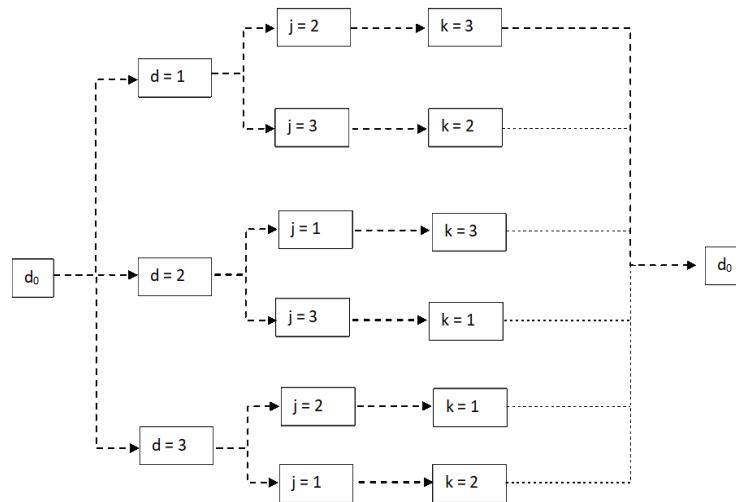
C conjunto de clientes, compradores de fardos, com $c \in C$

F conjunto de fornecedores, com $f \in F$ (o material é entregue no centro intermediário pelo fornecedor)

T conjunto de períodos, com $t \in T$.

Três conjuntos diferentes (D, J, K) foram selecionados para diferenciar os pontos de coleta em uma mesma viagem. Por exemplo, considere $D = 1, 2, 3, V = 1, B = 1, T = 1$ e que todos os pontos de coleta deverão ser visitados (Figure 12):

Figura 12 – Exemplo de roteamento entre os pontos de coleta.



Fonte: preparado pelo autor. Adaptação publicada em Defalque, Silva e Marins (2021)

O objetivo é diferenciar os pontos de coleta na sequência. Se a rota inicia com o ponto de coleta 1, há somente duas possibilidades para o segundo ponto. Ou seja, o segundo ponto deve ser diferente do primeiro e $J = 2, 3, K = 2$ e $K = 3$ são usados para representar todas as possibilidades.

Parâmetros:

θ_{bt} número total de viagens possível do veículo b no período t (adaptado de Anghinolfi et al. (2013)).

kt_b capacidade de transporte do veículo b .

kpc_{dt} capacidade de armazenamento de material em cada ponto de coleta d no período t .

kd limite mínimo para coleta se um nó é visitado (caso haja deslocamento entre os pontos de coleta).

kh_{idt} quantidade de material i , disponível no ponto de coleta d , no período t .

dt_{dj} distância entre os pontos de coleta d e j .

cq_{idt} custo unitário de compra do material i no ponto de coleta d , no período t .

ed_{i_0d} quantidade de material i em estoque no início do horizonte de planejamento, no ponto de coleta d .

ck custo unitário para enviar o rejeito para descarte (baseado em (COUTO et al., 2017)).

w_i taxa de material i considerado não relevante (adaptado de Pati, Vrat e Kumar (2008a)).

ken capacidade de estoque, do centro intermediário, de material não enfardado.

kef capacidade de estoque de fardos, do centro intermediário.

ko_t capacidade operacional do centro intermediário, no período t .

dp_{ict} demanda do fardo i , pelo cliente c , no período t .

h_i custo unitário de estoque do material i .

en_{i_0} quantidade em estoque do material i , não enfardado, no início do horizonte de planejamento, no centro intermediário.

ef_{i_0} quantidade em estoque de fardos do material i , no início do horizonte de planejamento, no centro intermediário.

ct custo de transporte do material coletado, por distância unitária.

cf_{ift} custo unitário de compra do material i , do fornecedor f , no período t .

fr_c custo unitário de entrega dos fardos vendidos para o cliente c .

κ_{ift} limite inferior para a quantidade fornecida de material i , pelo fornecedor f , no período t .

η_{ift} limite superior para a quantidade fornecida de material i , pelo fornecedor f , no período t .

α_p valores escalares que referem-se aos pesos atribuídos a cada desvio, $p = 1, \dots, 8$, conforme a prioridade de otimização.

ktm_{bvt} meta de coleta de material pelo veículo b , durante a viagem v , no período t .

khm_{dbvt} meta de coleta de material no ponto de coleta d , pelo veículo b , durante a viagem v , no período t .

π meta de coleta de material ao longo do horizonte de planejamento.

χ_i meta de material i vendido ao longo do horizonte de planejamento.

λ_{ict} meta de material i vendido para o cliente c , no período t .

φ_t meta de fardos produzidos por período t .

$l_{b,v,t}$ meta de distância máxima percorrida para a coleta de material por veículo b , por viagem v , em cada período t .

Od meta de gastos para o horizonte de planejamento (baseado em Pati, Vrat e Kumar (2008a)).

Variáveis:

$qidbvt$ quantidade coletada de material i , no ponto de coleta d , pelo veículo b , durante a viagem v , no período t (adaptado de Pati, Vrat e Kumar (2008a)).

qc_{dbvt} capacidade ocupada do veículo b , durante a viagem v , no período t , após passar pelo ponto de coleta d (adaptado de Anghinolfi et al. (2013)).

qr_{ift} quantidade de material i , entregue pelo fornecedor f , no período t .

qf_{it} quantidade fabricada de fardos do material i , no período t .

qv_{ict} quantidade vendida de fardos do material i , para o cliente c , no período t .

qt_{it} quantidade total de material i disponível no centro intermediário, obtida a partir da coleta e entrega de resíduos de papel, no período t .

$$x_{djbvt} = \begin{cases} 1 & \text{se houve o deslocamento do veículo } b, \text{ do ponto de coleta } d \\ & \text{para o ponto de coleta } j, \text{ durante a viagem } v, \text{ no período } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$\delta_{bvt} = \begin{cases} 1 & \text{se o veículo } b \text{ foi empregado para a coleta na viagem } v, \text{ no período } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$\gamma_{dbvt} = \begin{cases} 1 & \text{se houve coleta de material no ponto de coleta } d, \text{ pelo veículo } b, \\ & \text{durante a viagem } v, \text{ no período } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

ed_{idt} quantidade de material i armazenado (não coletado pelo centro intermediário) no ponto de coleta d , ao final do período t .

en_{it} quantidade em estoque de material i não enfardado, no centro intermediário, ao final do período t .

ef_{it} quantidade em estoque de fardos do material i , no centro intermediário, ao final do período t .

Variáveis auxiliares:

dc^+ desvio a mais em relação à meta de gastos para o horizonte de planejamento.

df_{ict}^- desvio a menos em relação à meta de venda de fardos de material i , para o cliente c , no período t .

dq_i^- desvio a menos em relação à meta de venda de fardos de material i , ao longo do horizonte de planejamento.

da_t^- desvio a menos em relação à meta de produção total de fardos, em cada período t .

db^- desvio a menos em relação à meta de quantidade coletada de material ao longo do horizonte de planejamento.

dd_{bvt}^+ desvio a mais em relação à meta de distância percorrida por veículo b , por viagem v , em cada período t .

dv_{bvt}^- desvio a menos em relação à meta de quantidade coletada de material, pelo veículo b , por viagem v , em cada período t .

dg_{dbvt}^- desvio a menos em relação à meta de quantidade coletada de material, no ponto de coleta d , pelo veículo b , por viagem v , em cada período t .

Função objetivo: a função objetivo minimiza os desvios em relação às metas propostas.

OBJETIVOS ASSOCIADOS À SUSTENTABILIDADE

A minimização dos desvios dc^+ , df_{ict}^- , dq_i^- , da_t^- , db^- está diretamente associada ao planejamento econômico de forma a minimizar custos e maximizar a quantidade de fardos produzidos e vendidos.

A minimização de df_{ict}^- , dq_i^- , da_t^- , db^- está relacionada também a fatores ambientais, como o aumento dos índices de reciclagem. Quanto menor os desvios associados à coleta, produção e venda de fardos, maior será a quantidade de material reciclado.

Além disso, a minimização dos desvios dd_{bvt}^+ , dv_{bvt}^- , dg_{dbvt}^- não só ajuda as questões econômicas e ambientais descritas anteriormente, ao aumentar a quantidade de material coletado e minimizar os custos devido à otimização do planejamento logístico, mas também, contribui para a minimização dos índices de emissão de gases poluentes.

Por fim, a minimização dos desvios, conforme a variação de prioridades necessária para os diferentes cenários, auxilia o bom gerenciamento dos processos logísticos do setor, o que está associado não só aos fatores econômicos e ambientais mencionados anteriormente mas também possui um viés social, já que também contribui para o aumento do número de empregos e da renda do trabalhador.

Programação por Metas Ponderada: a função objetivo (1) minimiza a soma dos desvios em relação às metas propostas. α_p considera apenas os valores atribuídos pelo decisor. Este parâmetro juntamente com os valores oriundos da norma da soma irão compor o peso de cada meta.

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } Z = & \alpha_1 dc^+ + \alpha_2 \sum_{b \in B} \sum_{t \in T} dd_{bt}^+ + \alpha_3 \sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} df_{ict}^- + \alpha_4 \sum_{i \in I} dq_i^- + \alpha_5 \sum_{t \in T} da_t^- + \\ & \alpha_6 db^- + \alpha_7 \sum_{b \in B} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} dv_{bvt}^- + \alpha_8 \sum_{d \in D} \sum_{b \in B} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} dg_{dbvt}^- \end{aligned} \quad (1)$$

Programação por Metas Lexicográfica: a função objetivo (2) minimiza lexicograficamente os desvios em relação às metas propostas.

$$\begin{aligned} \text{Minimizar Lexicograficamente } Z = & dc^+, \sum_{b \in B} \sum_{t \in T} dd_{bt}^+, \sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} df_{ict}^-, \sum_{i \in I} dq_i^-, \sum_{t \in T} da_t^- \\ & db^-, \sum_{b \in B} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} dv_{bvt}^-, \sum_{d \in D} \sum_{b \in B} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} dg_{dbvt}^- \end{aligned} \quad (2)$$

Restrições:

As restrições em vermelho estão associadas às metas. (3) - (16) referem-se à coleta e ao transporte de material, considerando o roteamento de veículos de diferentes capacidades e mais de uma viagem possível por veículo. Tais restrições foram baseadas naquelas encontradas em Anghinolfi et al. (2013) e Defalque, Rangel e Ferreira (2011), que, por sua vez, foram baseadas em algumas restrições encontradas em Toth e Vigo (2002), Miller, Tucker e Zemlin (1960) e Desrochers e Laporte (1991)

De acordo com as restrições (3), o veículo b só poderá se deslocar de um ponto de coleta d para um único ponto de coleta $j \neq d$ qualquer, durante a viagem v , no período t .

$$\sum_{\substack{j \in J \\ d \neq j}} x_{djvbt} \leq 1, \forall b \in B, v \in V, t \in T \quad (3)$$

As restrições (4) garantem que se houve deslocamento, pelo veículo b , de um ponto de coleta

$d \neq d_0$ qualquer para um ponto de coleta $k \neq d$, então este veículo necessariamente saiu do ponto de origem d_0 (centro intermediário), durante a viagem v , no período t .

$$\sum_{\substack{j \in J \\ j \neq d_0}} x_{d_0 j b v t} \geq \sum_{\substack{d \in D \\ d \neq d_0}} x_{d k b v t}, \quad \forall k \in K, k \neq d, b \in B, v \in V, t \in T \quad (4)$$

As restrições (5) estabelecem que se houve deslocamento, pelo veículo b , de qualquer ponto de coleta d para um ponto de coleta $k \neq d$, então o mesmo veículo se deslocará do ponto de coleta k para um ponto de coleta $j \neq k$ qualquer, durante a viagem v , no período t .

$$\sum_{d \in D} x_{d k b v t} = \sum_{j \in J} x_{k j b v t}, \quad \forall k \in K, k \neq d, k \neq j, b \in B, v \in V, t \in T \quad (5)$$

De acordo com as restrições (6), se houve o deslocamento do veículo b do ponto de origem d_0 (centro intermediário) para um ponto de coleta $j \neq d_0$ qualquer, na viagem v e no período t , então o veículo b foi utilizado para a coleta de material, na mesma viagem v e no mesmo período t .

$$\delta_{b v t} = \sum_{\substack{j \in J \\ j \neq d_0}} x_{d_0 j b v t}, \quad \forall b \in B, v \in V, t \in T \quad (6)$$

As restrições (7) limitam o número de viagens v , por veículo b , no período t .

$$\sum_{v \in V} \delta_{b v t} \leq \theta_{b t}, \quad \forall b \in B, t \in T \quad (7)$$

As restrições (8) estabelecem que se houve deslocamento, pelo veículo b , do ponto de coleta $d \neq d_0$ para um ponto de coleta j qualquer, então houve coleta de material pelo mesmo veículo b , no ponto de coleta d , durante a viagem v , no período t .

$$\sum_{j \in J} x_{d j b v t} = \gamma_{d b v t}, \quad \forall d \in D, d \neq d_0, d \neq j, b \in B, v \in V, t \in T \quad (8)$$

De acordo com as restrições (9), se houve deslocamento do veículo b do centro intermediário d_0 para um ponto de coleta $j \neq d_0$ qualquer, em uma viagem v , sendo v no mínimo a segunda viagem no período t realizada por esse veículo b , então o veículo b se deslocou de um ponto de coleta qualquer $j \neq d_0$ para d_0 na viagem anterior. Ou seja, estas restrições proíbem o início de uma viagem por um veículo b no período t , se a viagem anterior não tiver sido completada pelo mesmo veículo. Portanto, é considerada viagem o percurso que tem como origem o centro intermediário d_0 e tem como destino final o mesmo centro intermediário, sendo os destinos intermediários os pontos de coleta (adaptado de

Anghinolfi et al. (2013)).

$$\sum_{\substack{j \in J \\ j \neq d_0}} x_{d_0 j b v t} \leq \sum_{\substack{j \in J \\ j \neq d_0}} x_{j d_0 b v-1 t}, \quad \forall b \in B, v \in V, v \neq 1, t \in T \quad (9)$$

As restrições (10) limitam a coleta de material durante a viagem v no período t à capacidade de transporte do veículo b , se o veículo b foi utilizado para a coleta de material nesta viagem e neste período.

$$\sum_{i \in I} \sum_{\substack{d \in D \\ d \neq d_0}} q_{i d b v t} \leq k t_b \delta_{b v t}, \quad \forall b \in B, v \in V, t \in T \quad (10)$$

As restrições (11) referem-se à meta de quantidade mínima coletada de material pelo veículo b por viagem v por período t , se o veículo b foi utilizado para a coleta de material nesta viagem v e neste período t . Esta meta foi considerada para um melhor emprego da frota de veículos, diminuindo a subutilização em relação às capacidades de transporte.

$$\sum_{i \in I} \sum_{\substack{d \in D \\ d \neq d_0}} q_{i d b v t} + d v_{b v t}^- \geq k t m_{b v t} \delta_{b v t}, \quad \forall b \in B, v \in V, t \in T \quad (11)$$

As restrições (12) referem-se à meta de quantidade coletada, no ponto de coleta d , pelo veículo b , por viagem v , por período t , se houve coleta de material em d pelo veículo b na viagem v no período t . Neste caso, observou-se a necessidade de considerar uma coleta mínima em cada ponto de coleta, para compensar os custos e o tempo com o transporte, auxiliando o processo de tomada de decisão em relação ao deslocamento, ou não, para um determinado ponto de coleta.

$$\sum_{i \in I} q_{i d b v t} + d g_{d b v t}^- \geq k h m_{d b v t} \gamma_{d b v t}, \quad \forall d \in D, b \in B, v \in V, t \in T \quad (12)$$

Se houve deslocamento do ponto de coleta d pelo veículo b , durante a viagem v , no período t , as restrições (13) obrigam que haja uma coleta mínima de material. Este limite inferior é necessário para que não haja deslocamento para um ponto de coleta sem que ocorra a coleta de material. Isto não será impedido pelas restrições (12) quando o valor da meta $k h m_{d b v t}$ for um percentual da quantidade disponível para coleta ou quando apenas uma solução viável for encontrada com o valor do desvio $d g_{d b v t}^-$ diferente de zero.

$$\sum_{i \in I} q_{i d b v t} \geq k d \gamma_{d b v t}, \quad \forall d \in D, b \in B, v \in V, t \in T \quad (13)$$

As restrições (14) limitam a quantidade de material coletada no ponto de coleta d , pelo veículo b na viagem v no período t à capacidade ocupada do veículo b após passar pelo ponto de coleta d (adaptado de Anghinolfi et al. (2013)).

$$\sum_{i \in I} q_{idbvt} \leq q_{c_{dbvt}}, \quad \forall d \in D, d \neq d_0, b \in B, v \in V, t \in T \quad (14)$$

As restrições (3), (4), (5), (9) podem gerar subrotas. Portanto, as restrições (15) são restrições para a eliminação de subrotas (ANGHINOLFI et al., 2013; TOTH; VIGO, 2002; MILLER; TUCKER; ZEMLIN, 1960; DESROCHERS; LAPORTE, 1991).

$$q_{c_{jbvt}} \geq q_{c_{dbvt}} + kt_b(x_{djbt} - 1) + \sum_{i \in I} q_{ijbvt}, \quad (15)$$

$$\forall d \in D, d \neq d_0, j \in J, j \neq d_0, d \neq j, b \in B, v \in V, t \in T$$

Se houve deslocamento do veículo b de um ponto de coleta d qualquer, para um ponto de coleta $j \neq d$ e d_0 , durante a viagem v no período t , as restrições (16) limitam a capacidade ocupada do veículo b após passar pelo ponto de coleta j à capacidade do veículo b (adaptado de Anghinolfi et al. (2013)).

$$q_{c_{jbvt}} \leq kt_b \sum_{d \in D} x_{djbt}, \quad \forall j \in J, j \neq d, j \neq d_0, b \in B, v \in V, t \in T \quad (16)$$

De acordo com as restrições (17), a quantidade não coletada e armazenada de material i no ponto de coleta d ao final do período t é igual à quantidade total de material i disponível para coleta no ponto d no período t menos a quantidade de material i coletada por todos os veículos b em todas as viagens v no período t .

$$kh_{idt} + ed_{idt-1} - \sum_{b \in B} \sum_{v \in V} q_{idbvt} = ed_{idt}, \quad \forall i \in I, d \in D, t \in T \quad (17)$$

Conforme as restrições 18, a quantidade total não coletada e armazenada no ponto de coleta d ao final do período t está limitada à capacidade de armazenamento de material em cada ponto de coleta d no período t .

$$\sum_{i \in I} ed_{idt} \leq kpc_{dt}, \quad \forall d \in D, t \in T \quad (18)$$

Nos pontos de coleta onde a armazenagem de material não é possível (por não possuir, por exemplo, capacidade para armazenar material, $kpc_{dt} = 0$), a variável relacionada deve ser igual a zero $ed_{idt} = 0$.

Neste caso, faz-se necessária a alteração da igualdade das restrições (17) para desigualdades do tipo \geq , tornando-as iguais às restrições (20) apresentadas a seguir. Observe que mantendo a igualdade, haverá obrigatoriedade de coleta de todo o material disponível nos pontos de coleta, o que pode tornar o modelo infactível, conforme os valores dos parâmetros considerados. Quando a capacidade dos pontos de coleta não for considerada na modelagem, ou seja, $kpc_{dt} = 0$, a quantidade não coletada do material no ponto de coleta, no período, não estará disponível para o próximo período. Neste caso, pode-se considerar, por exemplo, que se o material não foi vendido para o centro intermediário, então foi comercializado para um outro cliente naquele mesmo período.

As restrições (19) limitam a quantidade coletada de material i por todos os veículos b no ponto de coleta d na viagem v no período t à diferença entre a quantidade total disponível de material i em d no período t e a quantidade coletada de material i por todos os veículos b no ponto de coleta d na viagem anterior ($v - 1$, com $v \neq 1$).

$$\sum_{b \in B} q_{idbvt} \leq kh_{idt} + ed_{idt-1} - \sum_{b \in B} q_{idv-1t}, \quad \forall i \in I, d \in D, v \in V, v \geq 2, t \in T \quad (19)$$

As restrições (20) limitam a quantidade coletada de material i por todos os veículos b no ponto de coleta d em todas as viagens v no período t à quantidade total disponível de material i em d no período t .

$$\sum_{b \in B} \sum_{v \in V} q_{idbvt} \leq kh_{idt} + ed_{idt-1}, \quad \forall i \in I, d \in D, t \in T \quad (20)$$

As restrições (21) referem-se à meta de quantidade total coletada ao longo do horizonte de planejamento e foi adaptada de Pati, Vrat e Kumar (2008a).

$$\sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{b \in B} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} q_{idbvt} + db^- \geq \pi \quad (21)$$

As restrições (22) - (36) estão relacionadas à produção e venda de fardos pelo centro intermediário.

De acordo com as restrições (22), a quantidade total de material i no centro intermediário no período t é igual a soma entre a quantidade total de material i coletado no período e a quantidade total do mesmo material entregue no centro intermediário.

$$\sum_{d \in D} \sum_{b \in B} \sum_{v \in V} q_{idbvt} + \sum_{f \in F} qr_{ift} = qt_{it}, \quad \forall i \in I, t \in T \quad (22)$$

As restrições (23) limitam inferiormente e superiormente a quantidade entregue de material i por cada fornecedor f em cada período t .

$$\kappa_{ift} \leq qr_{ift} \leq \eta_{ift}, \forall i \in I, f \in F, t \in T \quad (23)$$

As restrições (24) estabelecem que a quantidade produzida de fardos de material i no período t é igual à diferença entre a quantidade de material i relevante disponível no período (soma entre as quantidades coletada, entregue no período e estoque de material não enfardado no período anterior) e o estoque de material i , não enfardado, ao final do período t . O parâmetro "taxa de resíduos não relevantes" foi baseado em Pati, Vrat e Kumar (2008a).

$$qt_{it}(1 - w_i) + en_{it-1} - en_{it} = qf_{it}, \forall i \in I, t \in T \quad (24)$$

De acordo com as restrições (25), a quantidade vendida de fardos de material i no período t é igual à diferença entre a soma da quantidade produzida de fardos de material i no período t com o estoque de fardos de material i do período anterior e o estoque de fardos de material i ao final do período t .

$$\sum_{c \in C} qv_{ict} = qf_{it} + ef_{it-1} - ef_{it}, \forall i \in I, t \in T \quad (25)$$

As restrições (26) estabelecem que a quantidade vendida de material ao longo do horizonte de planejamento não deve ultrapassar a demanda.

$$\sum_{t \in T} qv_{ict} \leq \sum_{t \in T} dp_{ict}, \forall i \in I, c \in C \quad (26)$$

As restrições (27) limitam a quantidade produzida de fardos por período.

$$\sum_{i \in I} qf_{it} \leq ko_t, \forall t \in T \quad (27)$$

As restrições (28) e (29) limitam o estoque de material relevante não enfardado e em fardos, respectivamente.

$$\sum_{i \in I} en_{it} \leq ken, \forall t \in T \quad (28)$$

$$\sum_{i \in I} ef_{it} \leq kef, \forall t \in T \quad (29)$$

As restrições (30) estão relacionadas à meta de venda de material i ao longo do horizonte de planejamento.

$$\sum_{c \in C} \sum_{t \in T} qv_{ict} + dq_i^- \geq \chi_i, \forall i \in I \quad (30)$$

As restrições (31) estão relacionadas à meta de venda de material i por período. Observou-se a necessidade desta meta para um melhor controle de estoque e saída/entrega de material por período. Um estudo sobre a necessidade desta meta será apresentado nos testes com exemplares ilustrativos.

$$qv_{ict} + df_{ict}^- \geq \lambda_{ict}, \forall i \in I, c \in C, t \in T \quad (31)$$

As restrições (32) estão relacionadas à meta de produção de fardos por período.

$$\sum_{i \in I} qf_{it} + da_t^- \geq \varphi_t, \forall t \in T \quad (32)$$

As restrições (33) estão relacionadas ao custo total por período e foram baseadas em Pati, Vrat e Kumar (2008a). Os custos considerados envolvem, nesta ordem: custo de estoque, custo de compra de material dos pontos de coleta e dos fornecedores (material entregue), custo de entrega de fardos vendidos, custo de coleta de material e custo de descarte de rejeitos.

$$r_t = \sum_{i \in I} h_i(en_{it} + ef_{it}) + \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{b \in B} \sum_{v \in V} cq_{idt} q_{idbvt}(1 - w_i) + \sum_{f \in F} \sum_{i \in I} cf_{ift} qr_{ift}(1 - w_i) + \sum_{c \in C} \sum_{i \in I} fr_c qv_{ict} + \sum_{d \in d} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{v \in V} ct dt_{dj} x_{djvbt} + ck \sum_{i \in I} qt_{it} w_i, \forall t \in T \quad (33)$$

As restrições (34) referem-se à meta de distância percorrida por veículo, por viagem, em cada período.

$$\sum_{d \in D} \sum_{\substack{j \in J \\ j \neq d}} dt_{dj} x_{djvbt} - dd_{bvt}^+ \leq l_{bvt}, \forall b \in B, v \in V, t \in T \quad (34)$$

As restrições (35) referem-se à meta de gastos ao longo do horizonte de planejamento e foi adaptada de Pati, Vrat e Kumar (2008a).

$$\sum_{t \in T} r_t - dc^+ \leq Od \quad (35)$$

As restrições (36) são de domínio das variáveis.

$$\begin{aligned}
ed_{idt}, q_{idbvt}, qr_{ift}, qc_{dbvt} &\geq 0; x_{dj bvt}, \gamma_{dbvt}, \delta_{bvt} \in \{0, 1\} \\
db^-, da_t^-, dd_t^+, dv_{bvt}^-, dg_{dbvt}^-, dq_i^-, df_{ict}^-, dc^+ &\geq 0 \\
qf_{it}, en_{it}, ef_{it}, qv_{ict} &\geq 0 \\
\forall i \in I, d \in D, c \in C, f \in F, j \in J, b \in B, v \in V, t \in T
\end{aligned} \tag{36}$$

3.3.2 Análise de alguns parâmetros considerados

Observa-se que ao considerar três metas associadas à coleta (ktm_{bvt} , khm_{dbvt} , π), a representação de situações reais envolvendo a coleta de materiais é ampliada, já que há possibilidade de variações de cenários, inclusive pela possibilidade de considerar o valor zero para alguma meta quando não for necessário.

A meta de coleta de material pelo veículo b , durante a viagem v , no período t (ktm_{bvt}) auxilia o planejamento da coleta com o controle da quantidade mínima coletada por veículo, do número necessário de viagens por veículo e por período e da minimização da capacidade ociosa do veículo durante a coleta.

A meta de coleta de material no ponto de coleta d , pelo veículo b , durante a viagem v , no período t (khm_{dbvt}) está associada à quantidade mínima coletada em cada viagem. Muitas empresas estabelecem um acordo de coleta mínima com o fornecedor para que a coleta não seja inviável financeiramente.

Como as duas metas anteriores estão associadas apenas à organização da coleta, não garantindo a coleta da quantidade mínima necessária ao longo do horizonte de planejamento, a meta π foi considerada para esta finalidade.

Da mesma forma, há três metas associadas à produção e venda de fardos. A φ_t auxilia o controle da produção mínima diária e estoque de fardos que pode ser alterada de acordo com as variações de cenário. Por exemplo, em períodos cuja demanda de fardos é baixa mas a quantidade disponível de material para coleta é alta, há necessidade de controle de estoque para posterior atendimento à demanda.

A meta λ_{ict} auxilia o controle da quantidade que será entregue de material i para o cliente c , no período t . Esta meta controla o adiantamento ou atraso da entrega de um material para um cliente em um período. Entretanto, como a entrega para um cliente pode ser dividida em um período, o planejamento da quantidade mínima que deve ser vendida, ou da previsão de atendimento à demanda de fardos de cada produto i , é estabelecida pela meta χ_i .

A meta de distância máxima percorrida para a coleta de material por veículo b , por viagem v , em cada período t (l_{bvt}), juntamente com a meta ktm_{bvt} e com o parâmetro θ_{bt} , que pode ser definido a partir da experiência do gestor, auxilia o controle do emprego dos veículos por período.

Verificou-se também que em muitas empresas que trabalham com resíduos de papel, alguns fornecedores entregam o material no centro intermediário. Por esse motivo, a variável qr_{ift} foi considerada para representar o resíduo que foi recebido pela empresa. A previsão de recebimento de material é representada pelos valores de κ_{ift} e η_{ift} que limitam inferiormente e superiormente

a variável. Em se tratando de empresas cujo recebimento de material não é significativo, pode-se considerar $\eta_{ift} = 0$.

Destaca-se, ainda, a variável ed_{idt} que controla o armazenamento de material nos pontos de coleta. Observou-se que algumas empresas estabelecem acordo de coleta, comentado anteriormente, ou, até mesmo, deixam caçambas no ponto de coleta para acumular material. Logo, ed_{idt} , limitado pela capacidade de armazenamento, auxilia o planejamento da coleta dos resíduos. Quando não há a possibilidade de armazenamento, pode-se considerar a capacidade de armazenamento igual a zero.

Finalmente, os custos com o recebimento, transporte, estoque e produção de material são controlados pela meta Od .

Verifica-se, assim, que as restrições, os parâmetros e os objetivos foram considerados de forma a representar vários cenários encontrados em empresas que conectam as etapas de coleta e reciclagem de resíduos de papel.

3.3.3 Testes com exemplares ilustrativos

Nesta seção, são apresentados testes com diferentes cenários para um melhor entendimento do modelo. Os valores dos parâmetros utilizados no primeiro teste (T1) estão descritos no Quadro 8. Os valores de cq_{idt} correspondem à média aproximada do preço das aparas marrons, aparas brancas e mistas disponíveis em Anguti Estatística (2018) e fr_c correspondem à média aproximada dos preços de fretes para deslocamentos de até 100 km, encontrados em Anguti Estatística (2018). Em se tratando dos valores de dt_{dj} , foi considerado que $dt_{dj} \leq dt_{jd} \leq dt_{dj} + 5$. Os outros testes realizados com variações dos parâmetros do exemplar ilustrativo estão descritos no Quadro 9. Foram realizados testes considerando variações associadas: a possibilidade e impossibilidade de armazenamento de material nos pontos de coleta; ao aumento do número viagens; a diminuição da meta de previsão de gastos; ao aumento do número de veículos; a capacidade dos veículos; a diminuição da meta associada à distância máxima percorrida por veículo, por viagem, por período. O número total de variáveis, o número de variáveis binárias e o número de restrições pertencem ao intervalo [90, 350].

Quadro 8 – Valores dos parâmetros para o exemplar ilustrativo T1

Índices e parâmetros	Exemplar T1
$ T $	2
$ B $	1
$ D $	6
$ I $	1
$ V $	1
$ C $	2
$ F $	3
π	Igual à quantidade total disponível para coleta ($\sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} kh_{idt}$).
ktm_{bvt}	Igual à capacidade de transporte do veículo kt_b .
khm_{dbvt}	Igual à soma da quantidade de material i disponível em cada ponto de coleta d no período t ($\sum_{i \in I} kh_{idt}$).
Od	R\$20.000,00
l_{bvt}	Solução do modelo auxiliar (Apêndices D e F).
χ_i	Igual à demanda de fardos do material i ao longo do horizonte de planejamento ($\sum_{c \in C} \sum_{t \in T} dp_{ict}$).
λ_{it}	Igual à demanda de fardos do material i no período t ($\sum_{c \in C} dp_{ict}$).
φ_t	Igual à soma da quantidade de material relevante coletada e recebida no período t e disponível em estoque no início do mesmo período.
kh_{idt}	Gerado aleatoriamente (0 t, 10 t)
kpc_{dt}	Ilimitado para todo ponto de coleta d em cada período t
kt_b	10 t
dt_{dj}	Gerado aleatoriamente (1 km, 30 km)
cq_{idt}	R\$ 628,17/t
kd	$0,000001 \times \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} kh_{idt}$
ck	R\$50,00/t
w_i	2%/t
ken	50 t
kef	100 t
ko_t	30 t
dp_{ict}	$c_1 = 5t, c_2 = 8t$
h_i	R\$ 10,00/t
ct	R\$5,00/km
cf_{ift}	R\$450,00
fr_c	R\$44,39/t
en_{i_0}	0
ef_{i_0}	0
κ_{ift}	0
η_{ift}	Gerado aleatoriamente (1 t, 5 t)
α_p	igual a 1 $\forall p$

Fonte: preparado pelo autor com base em dados reais e em dados disponíveis em Anguti Estatística (2018)

Quadro 9 – Testes realizados com os exemplares ilustrativos

Testes	Alterações em relação ao Quadro 8
T1	-
T2	$\sum_{i \in I} kpc_{idt} = 0, \forall d, t$
T3	$ V = 2$
T4	$Od = R\$ 10.000,00$
T5	$ B = 2, kt_{b_1} = 10, kt_{b_2} = 17$
T6	$l_{bvt} = 34, \forall b, v, t$

Fonte: preparado pelo autor.

Seja (2) reescrita como Minimizar $Z = Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_7, Z_8$, em que $Z_p, p \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$, corresponde às variáveis de desvio ou somas destas variáveis, como apresentado no Quadro 10.

Quadro 10 – Nomenclatura para as expressões que compõem a função objetivo

Nomenclatura	Expressões
Z_1	dc^+
Z_2	$\sum_{b \in B} \sum_{t \in T} dd_{bt}^+$
Z_3	$\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} df_{ict}^-$
Z_4	$\sum_{i \in I} dq_i^-$
Z_5	$\sum_{t \in T} da_t^-$
Z_6	db^-
Z_7	$\sum_{b \in B} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} dv_{bvt}^-$
Z_8	$\sum_{d \in D} \sum_{b \in B} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} dg_{dbvt}^-$

Fonte: preparado pelo autor.

As próximas seções foram organizadas para verificar os resultados conforme a variação da técnica utilizada para o modelo multiobjetivo (Programação por Metas Lexicográfica e Programação por Metas Ponderada) e conforme a variação dos cenários analisados.

3.3.4 Programação por Metas Lexicográfica (LGP)

Os testes apresentados nesta seção foram realizados com a utilização da Programação por Metas Lexicográfica (LGP) e foram organizados considerando-se variações de ordem de prioridades de $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_7$ e Z_8 conforme mostra o Quadro 11. A prioridade do tipo “P1” é aquela cuja ordem de otimização considerada foi: $Z_6, Z_1, Z_2, Z_7, Z_8, Z_3, Z_4, Z_5$, e assim, sucessivamente.

De acordo com os resultados obtidos com as variações de P1 a P9 em cada teste, foram realizadas novas alterações de ordem de prioridade, denominada P10, específica para cada teste, apresentadas no Quadro 12. As variações das prioridades são importantes para verificar os *tradeoff* entre as metas.

Quadro 11 – Prioridades de Otimização

Prioridades	Organização das prioridades
P1	$Z_6, Z_1, Z_2, Z_7, Z_8, Z_3, Z_4, Z_5$
P2	$Z_6, Z_5, Z_1, Z_2, Z_7, Z_8, Z_3, Z_4$
P3	$Z_6, Z_5, Z_8, Z_3, Z_4, Z_7, Z_1, Z_2$
P4	$Z_8, Z_5, Z_3, Z_4, Z_6, Z_7, Z_2, Z_1$
P5	$Z_8, Z_5, Z_7, Z_6, Z_3, Z_4, Z_2, Z_1$
P6	$Z_1, Z_4, Z_6, Z_8, Z_7, Z_3, Z_5, Z_2$
P7	$Z_1, Z_6, Z_4, Z_8, Z_7, Z_3, Z_5, Z_2$
P8	$Z_3, Z_6, Z_8, Z_7, Z_2, Z_5, Z_1, Z_4$
P9	$Z_4, Z_6, Z_8, Z_7, Z_2, Z_5, Z_1, Z_3$

Fonte: preparado pelo autor.

Quadro 12 – Prioridade P10 de otimização

Testes	Organização das prioridades
T1	$Z_7, Z_8, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_1, Z_2$
T2	$Z_7, Z_8, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_1, Z_2$
T3	$Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_7, Z_8, Z_6$
T4	$Z_1, Z_2, Z_5, Z_8, Z_7, Z_6, Z_3, Z_4$
T5	$Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_7, Z_6, Z_8$
T6	$Z_6, Z_5, Z_2, Z_3, Z_4, Z_7, Z_1, Z_8$

Fonte: preparado pelo autor.

Tabela 1 – Resultados dos testes realizados com os exemplares ilustrativos - LGP

Prioridade	Testes	$Z_1([R\$])$	$Z_2([km])$	$Z_3([t])$	$Z_4([t])$	$Z_5([t])$	$Z_6([t])$	$Z_7([t])$	$Z_8([t])$
P1	T1	0	0	0	0	0	45,54	0	0,24
	T2	0	0	0	0	0	45,54	0	0,48
	T3	5.447,264	0	26	26	58,80	25,54	0	11,43
	T4	2.696,132	0	26	26	29,40	45,54	0	6,61
	T5	14.495,56	0	26	26	0	11,54	0	8,27
	T6	0	0	0	0	0	45,54	0	0,6
P2	T1	0	0	0	0	0	45,54	0	0,24
	T2	0	0	0	0	0	45,54	0	0,48
	T3	5.487,264	0	26	26	0	25,54	0	11,43
	T4	2.716,132	0	26	26	0	45,54	0	6,61
	T5	14.495,56	0	26	26	0	11,54	0	8,27
	T6	0	0	0	0	0	45,54	0	0,6
P3	T1	0	0	0	0	0	45,54	0	0,24
	T2	0	0	0	0	0	45,54	0	0,48
	T3	6.611,404	0	0	0	0	25,54	0	0,87
	T4	6.647,80	0	0	0	0	45,54	0	0,24
	T5	15.494,70	0	0	0	0	11,54	0	1,15
	T6	0	15	0	0	0	45,54	0	0,24
P4	T1	0	0	0	0	0	45,69	0,15	0
	T2	0	0	0	0	0	45,84	0,3	0
	T3	5.672,97	0	0	0	0	26,85	1,31	0
	T4	6.396,61	0	0	0	0	45,69	0,15	0
	T5	14.635,89	2	0	0	0	12,68	1,14	0
	T6	0	0	0	0	0	45,69	0,15	0
P5	T1	0	0	3,6214	0	0	55,54	0	0
	T2	0	0	7,2428	7,2428	0	65,54	0	0

	T3	0	0	3,6214	0	0	45,54	0	0
	T4	4.646,74	0	3,6214	0	0	55,54	0	0
	T5	2.180,84	0	3,6214	0	0	38,54	0	0
	T6	0	0	3,6214	0	0	55,54	0	0
P6	T1	0	0	0	0	0	45,54	0	0,24
	T2	0	0	0	0	0	45,54	0	0,48
	T3	0	0	3,2778	0	3,74	35,19	9,6528	0
	T4	0	0	6,2222	6,2222	0	64,499	8,9585	5,7185
	T5	0	0	6,3753	0	0	35,1510	6,611	0
	T6	0	15	0	0	0	45,54	0	0,24
P7	T1	0	0	0	0	0	45,54	0	0,24
	T2	0	0	0	0	0	45,54	0	0,48
	T3	0	0	26	26	42,4084	33,9031	8,3631	4,9731
	T4	0	0	26	26	21,2042	49,7215	4,1815	0,9415
	T5	0	0	26	26	0	33,8449	22,305	5,9049
	T6	0	15	0	0	0	45,54	0	0,24
P8	T1	0	0	0	0	0	45,54	0	0,24
	T2	0	0	0	0	0	45,54	0	0,48
	T3	6.611,404	0	0	0	0	25,54	0	0,87
	T4	6.647,80	0	0	0	0	45,54	0	0,24
	T5	15.494,70	0	0	0	0	11,54	0	1,15
	T6	0	15	0	0	0	45,54	0	0,24
P9	T1	0	0	0	0	0	45,54	0	0,24
	T2	0	0	0	0	0	45,54	0	0,48
	T3	6.545,404	0	6,6	0	0	25,54	0	0,87
	T4	6.647,80	0	0	0	0	45,54	0	0,24
	T5	15.364,69	0	13	0	0	11,54	0	1,15
	T6	0	15	0	0	0	45,54	0	0,24
P10	T1	0	0	3,6214	0	0	55,54	0	0
	T2	0	0	7,2428	7,2428	0	65,54	0	0
	T3	0	0	0	0	0	45,54	0	0,24
	T4	0	0	9,3796	9,3796	0	55,54	0	0
	T5	0	0	0	0	0	38,54	0	0,17
	T6	0	0	0	0	0	45,54	0	0,6

Fonte: preparado pelo autor.

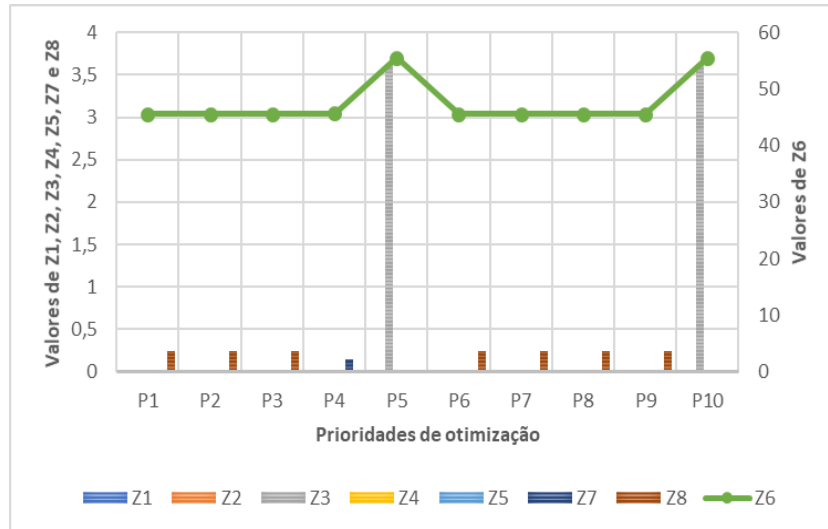
A Tabela 1 mostra os resultados dos desvios obtidos com os testes realizados. Observa-se que, de uma forma geral, as variações das prioridades apresentaram diferenças entre os resultados. Portanto, para uma melhor análise, as próximas seções apresentarão uma comparação entre as prioridades por teste e uma comparação entre os testes conforme a prioridade.

3.3.4.1 Comparação entre as prioridades por teste

Observa-se que a variação das prioridades pode alterar as soluções. Portanto, as Figuras 13, 14, 15, 16, 17 e 18 apresentam a relação entre as variações das prioridades dos desvios conforme o teste (T1, T2, T3, T4, T5 e T6).

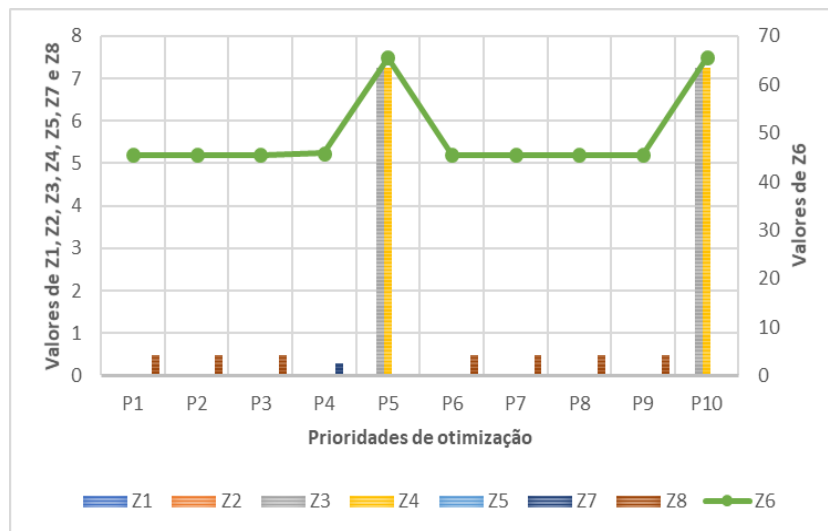
Nas Figuras 13 e 14 destaca-se as prioridades P5 e P10. Ao mudar a sequência priorizando Z_8 e Z_7 em vez de Z_6 , Z_3 e Z_4 , como em P1 à P4, a diminuição de Z_8 e Z_7 aumentou os valores de Z_6 , Z_3 e Z_4 .

Figura 13 – Valores dos desvios conforme a variação das prioridades de T1



Fonte: preparado pelo autor

Figura 14 – Valores dos desvios conforme a variação das prioridades de T2



Fonte: preparado pelo autor

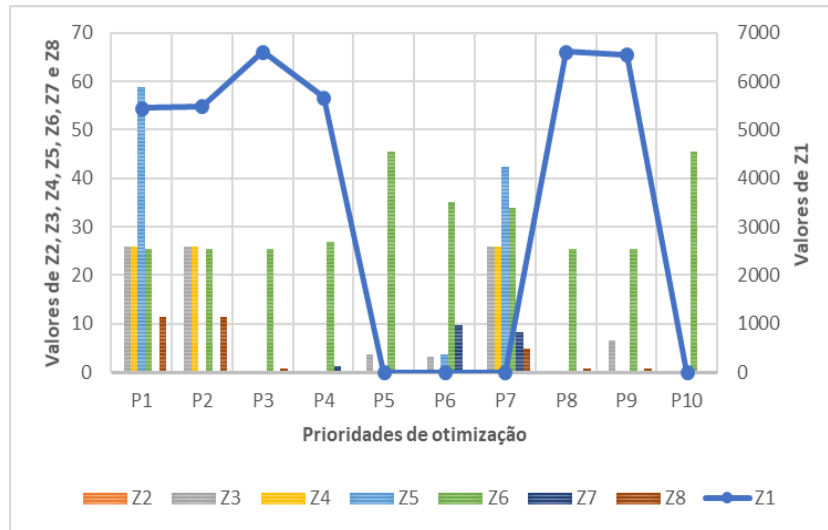
Na Figura 15, verifica-se que o aumento da quantidade coletada ao longo do horizonte de planejamento (minimização de Z_6) está associado ao aumento de outros desvios, como Z_1 , Z_3 , Z_4 , Z_5 , Z_7 e Z_8 . Ao comparar P1, P2 e P3, que apresentam o menor valor de Z_6 em T3, verifica-se que o menor valor de Z_1 está associado a valores diferentes de zero em Z_3 , Z_4 , Z_5 e Z_8 .

Em P2, apesar de $Z_5 = 0$, o valor de Z_1 sofreu um pequeno aumento em relação à P1. Em P3, apesar de $Z_3 = 0$, $Z_4 = 0$, $Z_5 = 0$ e de uma diminuição de Z_8 em relação à P1 e P2, houve um aumento do valor de Z_1 .

Destaca-se ainda em P9, que o aumento de Z_3 está associado à diminuição de Z_1 . Ao comparar P8 e P9, cujas sequências se diferenciam pela troca de posição dos desvios Z_3 e Z_4 , verifica-se que o valor do desvio em relação à previsão de custos sofreu um aumento maior quando a prioridade foi a

minimização de Z_3 (P8) do que quando a diminuição do valor de Z_4 foi priorizada (P9). Isto acontece devido à possibilidade de aumento do custo de estoque, já que quando a entrega de material para o cliente deverá acontecer em um período previamente determinado, o fardo produzido com antecedência deverá ficar em estoque até a data de entrega.

Figura 15 – Valores dos desvios conforme a variação das prioridades de T3



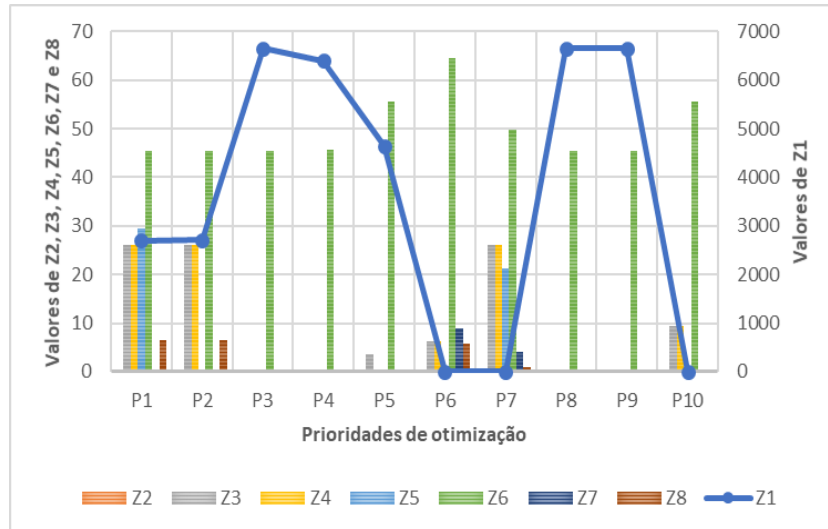
Fonte: preparado pelo autor

Assim como em T3, em T4 (Figura 16), ao comparar P1, P2 e P3, que apresentam o menor valor de Z_6 , verifica-se que o menor valor de Z_1 está associado a valores diferentes de zero de Z_3 , Z_4 , Z_5 e Z_8 .

Observa-se, assim, que em T4 (Figura 16), a variação da quantidade coletada está associada ao aumento do valor do desvio relacionado à previsão de gastos (Z_1). Ao comparar, por exemplo, os resultados de T4 para a prioridade P3 aos resultados de T3 para a prioridade P10, verifica-se que apenas os valores de Z_1 se diferenciam, sendo o valor de $Z_1 = 0$ em T3 e $Z_1 = 6.647,80$ em T4.

Destaca-se ainda em T4, a diferença entre P6 e P7. Ao minimizar Z_4 antes de Z_6 em P6 os valores de Z_3 , Z_4 e Z_5 foram menores do que os valores apresentados em P7. Em contrapartida, os valores de Z_6 , Z_7 e Z_8 foram maiores em P6.

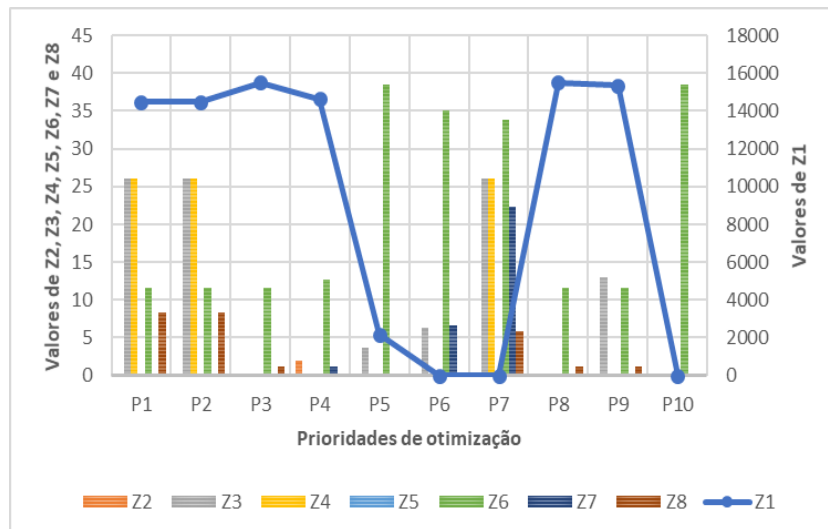
Figura 16 – Valores dos desvios conforme a variação das prioridades de T4



Fonte: preparado pelo autor

Observa-se na Figura 17, que em P1, P2 e P7 o atendimento à demanda ficou em segundo plano ($Z_3 = Z_4 = 26$). Como a minimização de Z_1 e Z_6 está no início da sequência de prioridades, manter material em estoque, neste caso, em vez de entregar o material, fez com que os custos fossem menores. Esta situação foi identificada por meio de entrevistas com os gestores das empresas, já que a coleta e a demanda podem variar de um período para o outro. Em alguns períodos, a prioridade é a coleta e quase não há demanda. Em outros, a quantidade disponível para coleta é menor e o material em estoque, coletado em outros períodos, é utilizado para atender à demanda. Destaca-se ainda em P9, que, assim como em T3, o aumento de Z_3 em T5 está associado à diminuição de Z_1 .

Figura 17 – Valores dos desvios conforme a variação das prioridades de T5



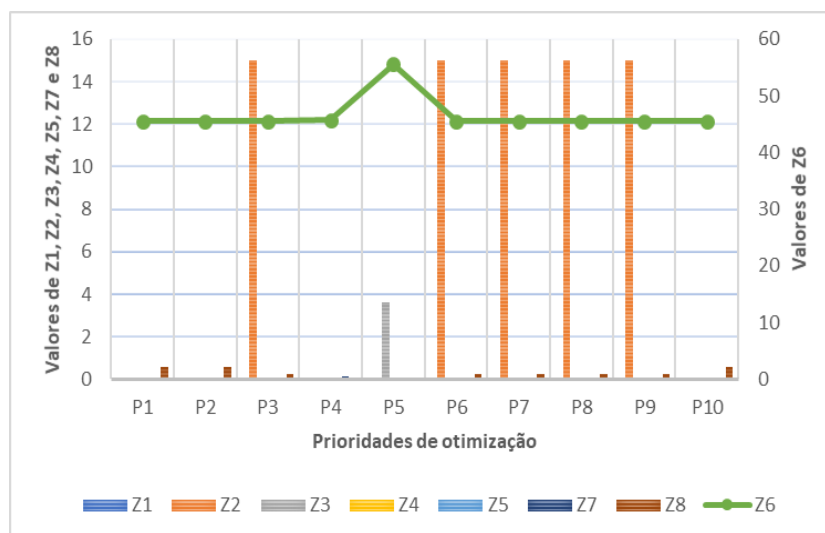
Fonte: preparado pelo autor

Na Figura 18, destaque para os valores de Z_2 , diferentes de zero em P3, P6, P7, P8 e P9. Ao comparar P3 a P10, que se diferenciam apenas pela troca das posições dos desvios Z_2 e Z_8 , observa-se

que a diminuição de Z_2 em P10 está associada ao aumento de Z_8 .

Ainda em T6, ao comparar P4 a P5, que se diferenciam pelas posições de Z_3 , Z_4 e Z_7 na sequência de prioridades, verifica-se em P5 o aumento dos valores de Z_3 e Z_6 e a diminuição do valor de Z_7 .

Figura 18 – Valores dos desvios conforme a variação das prioridades de T6



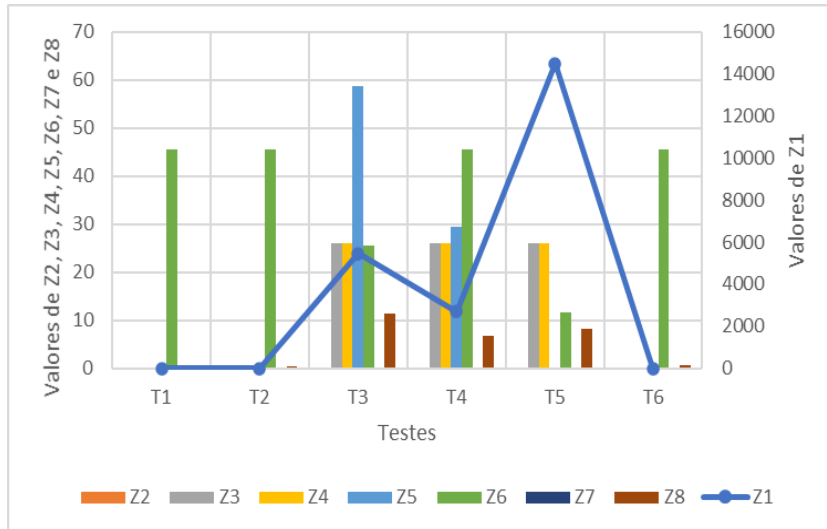
Fonte: preparado pelo autor

Na próxima seção, serão comparados apenas os testes realizados com as prioridades P1 a P9, ou seja, cuja mesma sequência foi utilizada para a realização de todos os testes.

3.3.4.2 Comparação entre os testes conforme a prioridade

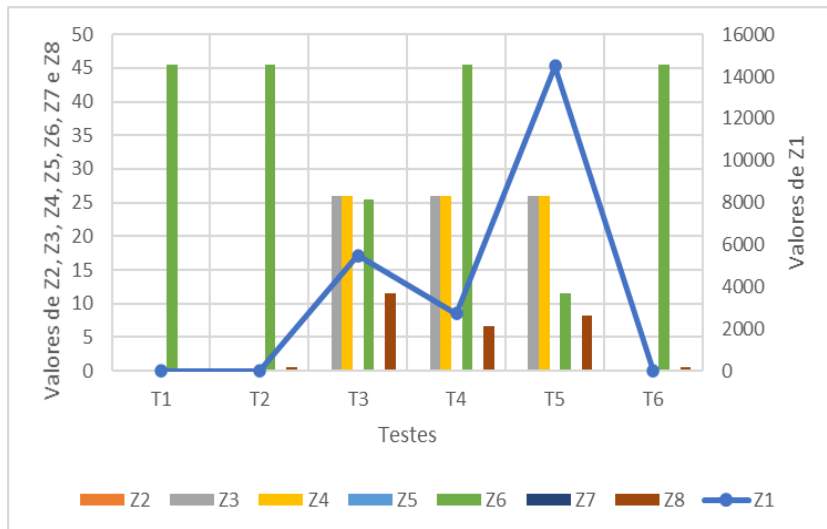
Verifica-se, de uma forma geral, que ao considerar a minimização de Z_6 como prioridade na sequência (Figuras 19, 20 e 21), todos os testes apresentaram os menores valores possíveis para Z_6 . Nas Figuras 22 e 23, a prioridade na sequência foi a minimização de Z_8 , resultando em $Z_8 = 0$. As Figuras 24 e 25 apresentaram os valores dos testes realizados com a minimização inicial de Z_1 , resultando em $Z_1 = 0$. Nas Figuras 26 e 27, destaca-se a alteração dos valores de Z_1 e Z_3 . Como observado na seção anterior, em exemplares com capacidade de estoque disponível, ao priorizar a minimização de Z_4 em relação à Z_3 , há a possibilidade de não atendimento à demanda por item, por cliente e por período (aumento de Z_3), apenas o atendimento à demanda ao longo do horizonte de planejamento (minimização de Z_4), ocasionando uma possível minimização dos custos devido à minimização de estoque.

Figura 19 – Comparação entre os testes - Prioridade P1



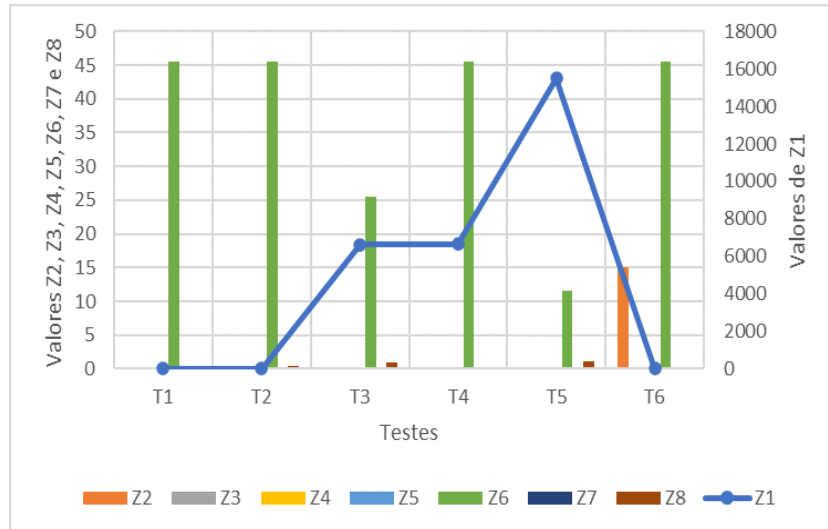
Fonte: preparado pelo autor

Figura 20 – Comparação entre os testes - Prioridade P2



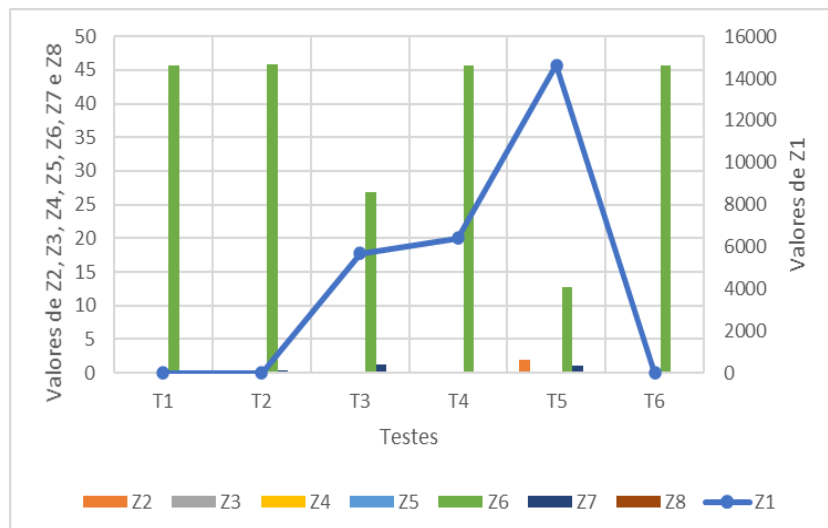
Fonte: preparado pelo autor

Figura 21 – Comparação entre os testes - Prioridade P3



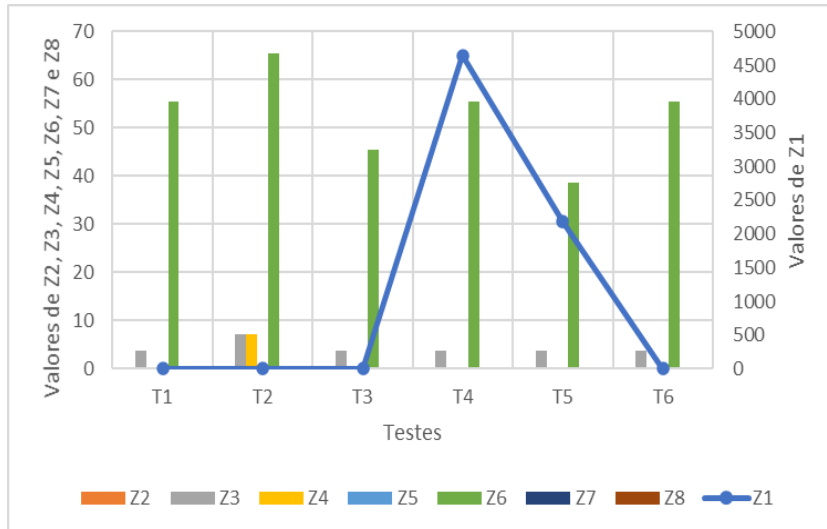
Fonte: preparado pelo autor

Figura 22 – Comparação entre os testes - Prioridade P4



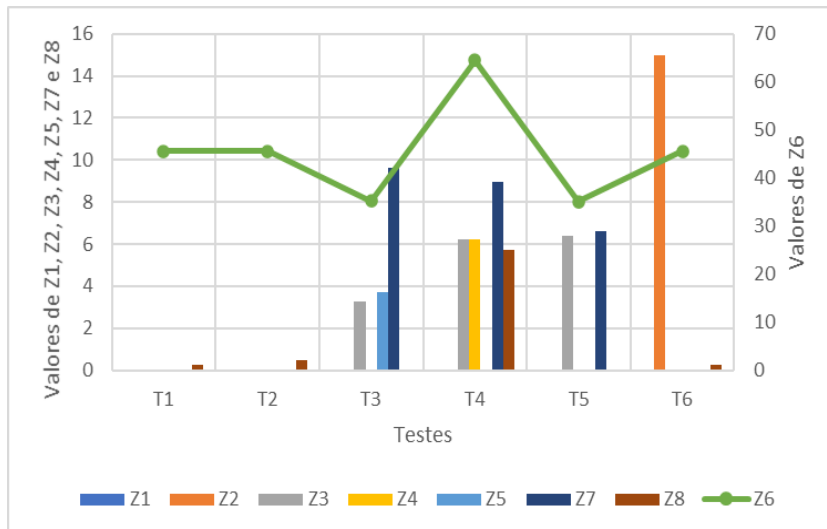
Fonte: preparado pelo autor

Figura 23 – Comparação entre os testes - Prioridade P5



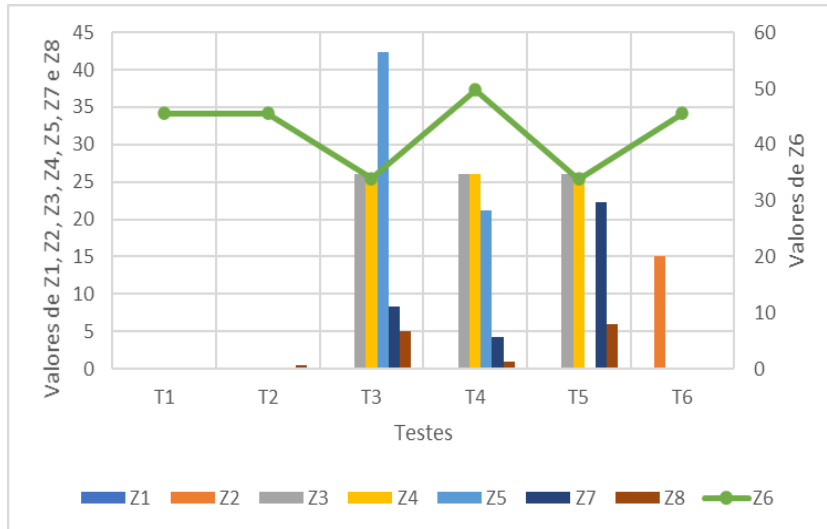
Fonte: preparado pelo autor

Figura 24 – Comparação entre os testes - Prioridade P6



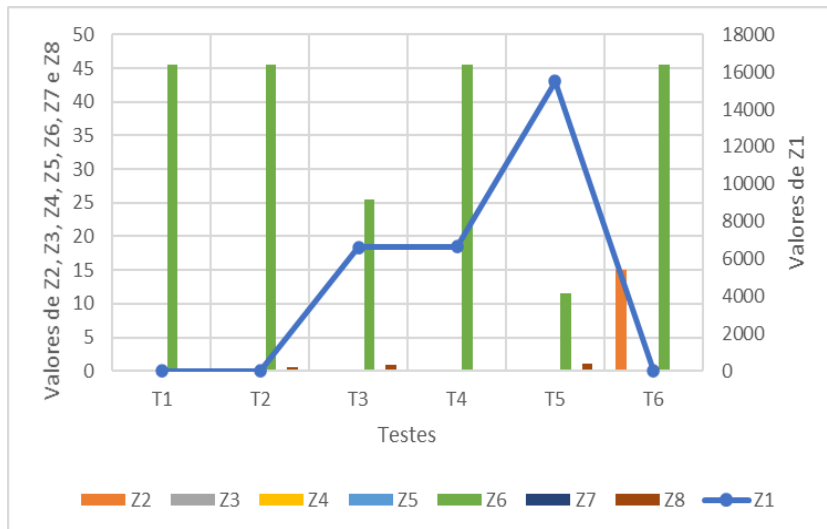
Fonte: preparado pelo autor

Figura 25 – Comparação entre os testes - Prioridade P7



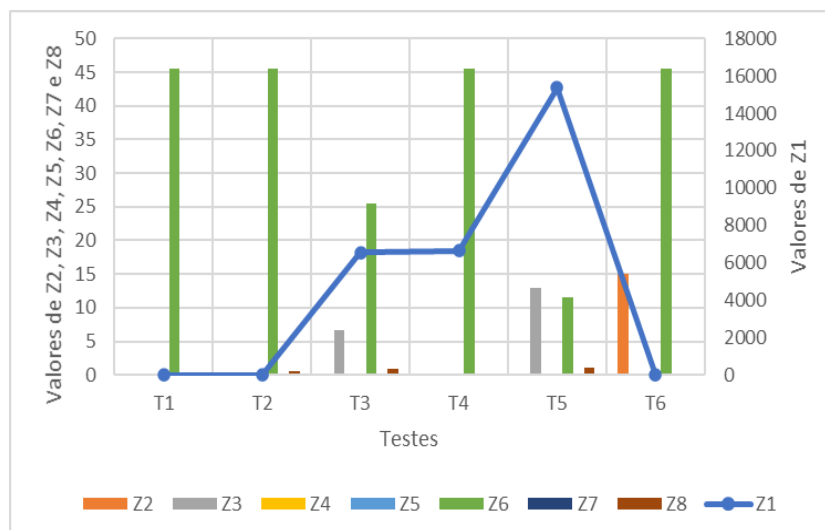
Fonte: preparado pelo autor

Figura 26 – Comparação entre os testes - Prioridade P8



Fonte: preparado pelo autor

Figura 27 – Comparação entre os testes - Prioridade P9



Fonte: preparado pelo autor

Observa-se que o aumento do número de viagens em T3 possibilitou um aumento na quantidade coletada de resíduos (minimização de Z_6) em relação à T1, T2, T4 e T6. Entretanto, em P3 (Figura 21), a organização considerando Z_6 como primeiro desvio a ser minimizado e Z_1 como penúltimo desvio a ser minimizado ressalta a associação entre a minimização de Z_6 e o aumento do desvio relacionado à previsão de gastos (Z_1).

Com o aumento do número de veículos disponíveis para coleta, T5 foi o teste que apresentou os menores valores de Z_6 . Entretanto, observa-se que esta diminuição de Z_6 também está associada ao aumento dos valores dos desvios como Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 , Z_7 e Z_8 . Verifica-se, também, nas Figuras 22 e 23, que ao priorizar a minimização de Z_8 , apesar da diminuição de Z_1 em relação à P1, P2 e P3, houve aumento de outros desvios, com destaque para Z_2 em P4 e Z_3 em P5.

Ainda na Figura 23, destaca-se que a impossibilidade de armazenamento de material nos pontos de coleta (teste T2) fez com que a demanda não atendida em um período, devido à falta de material adquirido, representada por Z_3 , não fosse atendida ao longo do horizonte de planejamento (valor de Z_4), o que não acontece em T1, pois o material não coletado em um período poderá ser coletado em um outro período.

Os resultados apresentados nas Figuras 21, 24, 25, 26 e 27 mostram que ao comparar os resultados de T6 aos de T1, por exemplo, o aumento da quantidade coletada fez com que o desvio da meta associada à quantidade transportada de material por veículo, por viagem, por período também fosse maior. Nota-se, ainda, um aumento nos desvios relacionados à quantidade coletada em cada ponto de coleta (Z_8), devido à redução da meta relacionada à distância percorrida (Z_2). Por exemplo, ao comparar os testes T1 e T6 na prioridade P3, verifica-se que os valores de Z_8 foram iguais, mas com $Z_2 = 0$ em T1 e $Z_2 = 15 \text{ km}$ em T6.

Verifica-se ainda nas Figuras 24 e 25 que ao priorizar a minimização de Z_1 , os valores de Z_3 , Z_4 , Z_5 , Z_6 , Z_7 e Z_8 sofreram alterações nos testes T3, T4 e T5. Em P6 (Figura 24), a minimização de Z_4 depois de Z_1 , mas antes de Z_6 , fez com que os valores de Z_3 e Z_4 fossem menores e os valores

de Z_6 fossem maiores em relação aos testes em P7. Variações dos valores de Z_5 , Z_7 e Z_8 também aconteceram com a alteração das prioridades.

3.3.5 Organização das prioridades conforme as unidades de medidas das metas

Seja $Z_s = Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8$. Os testes apresentados nesta seção, cujos resultados estão na Tabela 2, foram organizados considerando-se variações de ordem de prioridades de Z_1 , Z_2 e Z_s conforme mostra o Quadro 13. Estes desvios estão associados a metas cujas grandezas são respectivamente $[R\$]$, $[km]$ e $[t]$. A prioridade do tipo “PS1”, por exemplo, é aquela cuja ordem de otimização considerada foi: Z_1, Z_2, Z_s .

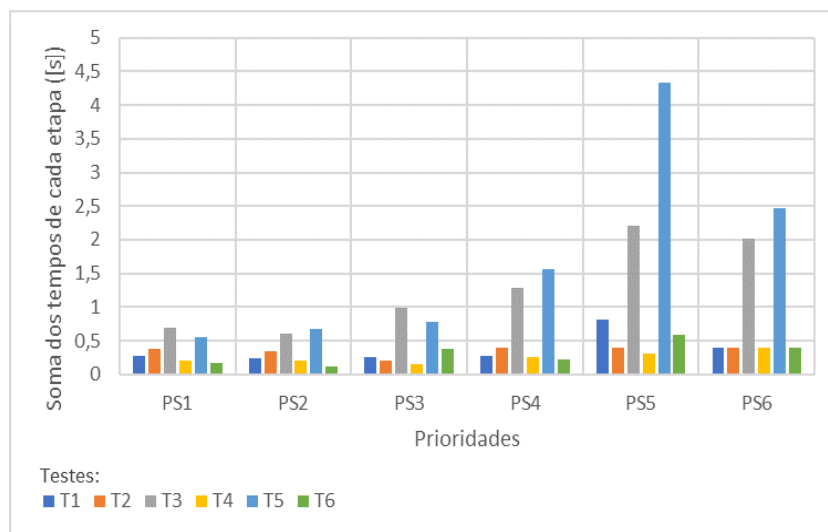
Quadro 13 – Prioridades conforme as unidades de medidas das metas

Prioridades de otimização	Organização das prioridades
PS1	Z_1, Z_2 e Z_s
PS2	Z_2, Z_1 e Z_s
PS3	Z_1, Z_s e Z_2
PS4	Z_2, Z_s e Z_1
PS5	Z_s, Z_1 e Z_2
PS6	Z_s, Z_2 e Z_1

Fonte: preparado pelo autor.

A Figura 28 ilustra o tempo total de processamento dado pela soma dos tempos de cada etapa conforme a ordem de otimização. Por exemplo, em PS1, o tempo total de processamento é dado pela soma do tempo de processamento para a minimização de Z_1 , em seguida Z_2 , com o valor de Z_1 fixo e, finalmente, a minimização de Z_s , com os valores de Z_1 e Z_2 fixos. Verifica-se que com o aumento do número de viagens (T3) e do número de veículos (T5), os tempos de solução para T3 e T5 foram os maiores.

Figura 28 – Soma dos tempos de processamento de cada etapa conforme a ordem de otimização



Fonte: preparado pelo autor

Tabela 2 – Resultados dos testes realizados com os exemplares ilustrativos - LGP - Prioridades conforme as unidades de medidas das metas

Prioridade	Testes	$Z_1([R\$])$	$Z_2([km])$	$Z_3([t])$	$Z_4([t])$	$Z_5([t])$	$Z_6([t])$	$Z_7([t])$	$Z_8([t])$	$Z_s([t])$
PS1	T1	0	0	0	0	0	45,54	0	0,24	45,78
	T2	0	0	0	0	0	45,54	0	0,48	46,02
	T3	0	0	0	0	0	35,84	0,3	0,24	36,38
	T4	0	0	9,3796	9,3796	0	55,54	0	0	74,299
	T5	0	0	0	0	0	38,54	0	0,17	38,71
	T6	0	0	0	0	0	45,69	0,15	0	45,84
PS2	T1	0	0	0	0	0	45,54	0	0,24	45,78
	T2	0	0	0	0	0	45,54	0	0,48	46,02
	T3	0	0	0	0	0	35,84	0,3	0,24	36,38
	T4	0	0	9,3796	9,3796	0	55,54	0	0	74,299
	T5	0	0	0	0	0	38,54	0	0,17	38,71
	T6	0	0	0	0	0	45,69	0,15	0	45,84
PS3	T1	0	0	0	0	0	45,54	0	0,24	45,78
	T2	0	0	0	0	0	45,54	0	0,48	46,02
	T3	0	0	0	0	0	35,84	0,3	0,24	36,38
	T4	0	0	9,3796	9,3796	0	55,54	0	0	74,299
	T5	0	0	0	0	0	38,54	0	0,17	38,71
	T6	0	15	0	0	0	45,54	0	0,24	45,78
PS4	T1	0	0	0	0	0	45,54	0	0,24	45,78
	T2	0	0	0	0	0	45,54	0	0,48	46,02
	T3	0	0	0	0	0	35,84	0,3	0,24	36,38
	T4	0	0	9,3796	9,3796	0	55,54	0	0	74,299
	T5	0	0	0	0	0	38,54	0	0,17	38,71
	T6	0	0	0	0	0	45,69	0,15	0	45,84
PS5	T1	0	0	0	0	0	45,54	0	0,24	45,78
	T2	0	0	0	0	0	45,54	0	0,48	46,02
	T3	6.600,97	0	0	0	0	25,69	0,15	0,24	26,08
	T4	6.647,803	0	0	0	0	45,54	0	0,24	45,78
	T5	15.494,70	0	0	0	0	11,54	0	1,15	12,69
	T6	0	15	0	0	0	45,54	0	0,24	45,78
PS6	T1	0	0	0	0	0	45,54	0	0,24	45,78
	T2	0	0	0	0	0	45,54	0	0,48	46,02
	T3	6.600,97	0	0	0	0	25,69	0,15	0,24	26,08
	T4	6.647,803	0	0	0	0	45,54	0	0,24	45,78
	T5	15.494,70	0	0	0	0	11,54	0	1,15	12,69
	T6	0	15	0	0	0	45,54	0	0,24	45,78

Fonte: preparado pelo autor.

Ao comparar PS3 e PS4, observa-se que ao alterar a prioridade de otimização em PS4, o valor de Z_2 diminuiu em relação ao valor obtido em PS3, o que ocasionou não só uma diminuição de Z_8 , mas também um aumento de Z_6 e Z_7 . Em PS5 e PS6, ao priorizar Z_s , observa-se um aumento nos valores de Z_1 nos testes T3, T4 e T5, uma diminuição dos valores de Z_6 e Z_7 e alterações nos valores de Z_3 , Z_4 e Z_8 , em comparação com as demais sequências.

3.3.6 Programação por Metas Ponderada (WGP)

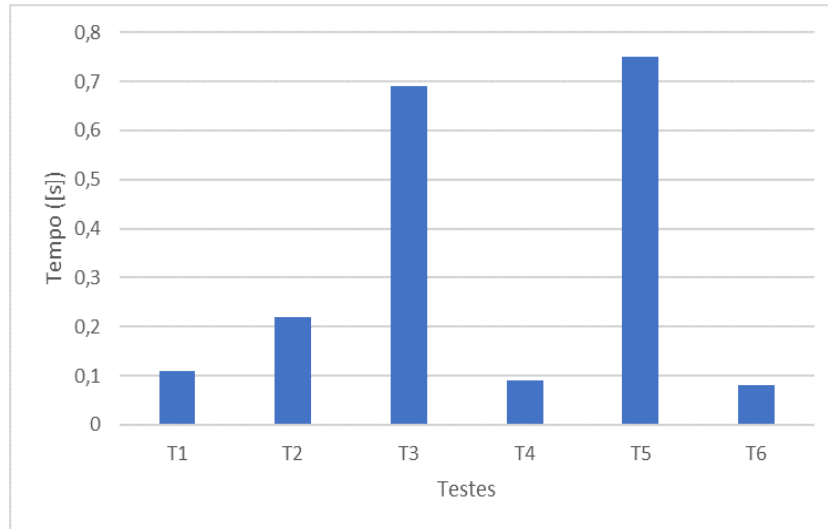
Seja $Z_p = \sum_{p \in P} \alpha_p Z_p$, $p \in P = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$. Para os testes apresentados nesta seção foi utilizada a Programação por Metas Ponderada (WGP) considerando $\alpha_p = 1$, $\forall p \in P$.

Como os objetivos do modelo desenvolvido neste trabalho possuem unidades de medidas diferentes, os testes foram realizados utilizando o Método WGP com a Normalização da Soma (TAMIZ; JONES; ROMERO, 1998). Neste método, cada variável de desvio da função objetivo foi dividida pela norma da soma (soma dos valores absolutos dos coeficientes das variáveis das restrições). Quando os valores dos coeficientes “do lado esquerdo” da restrição são pequenos se comparados aos valores das metas (“lado direito da restrição”), por apresentar divisores maiores, o Método de Normalização da Soma minimiza a possibilidade de distorções nos resultados se comparado ao método de Normalização Euclidiana

(TAMIZ; JONES; EL-DARZI, 1995; TAMIZ; JONES; ROMERO, 1998). No problema tratado nesta tese, as metas possuem como unidades de medidas [R\$], [km] e [t], além de diferenças também na ordem de grandeza. O código do modelo normalizado para o teste T1 está disponível no Apêndice E.

A Figura 29 ilustra o tempo total de processamento dos testes realizados com o método WGP. Verifica-se que, assim como nos testes realizados com o método LGP, ilustrados pela Figura 28, o aumento do número de viagens (T3) e do número de veículos (T5), ocasionou um aumento dos tempos de solução para T3 e T5. A Tabela 3 mostra os resultados obtidos com os testes realizados.

Figura 29 – Soma dos tempos de processamento de cada etapa, conforme a ordem de otimização



Fonte: preparado pelo autor

Tabela 3 – Resultados dos testes realizados com os exemplares ilustrativos - WGP

Testes	$Z_1([R\$])$	$Z_2([km])$	$Z_3([t])$	$Z_4([t])$	$Z_5([t])$	$Z_6([t])$	$Z_7([t])$	$Z_8([t])$
T1	0	0	0	0	0	45,69	0,15	0
T2	0	0	0	0	0	45,84	0,3	0
T3	5.672,97	0	0	0	0	26,85	1,31	0
T4	6.396,612	0	0	0	0	45,69	0,15	0
T5	14.635,89	2	0	0	0	12,68	1,14	0
T6	0	0	0	0	0	45,69	0,15	0

Fonte: preparado pelo autor.

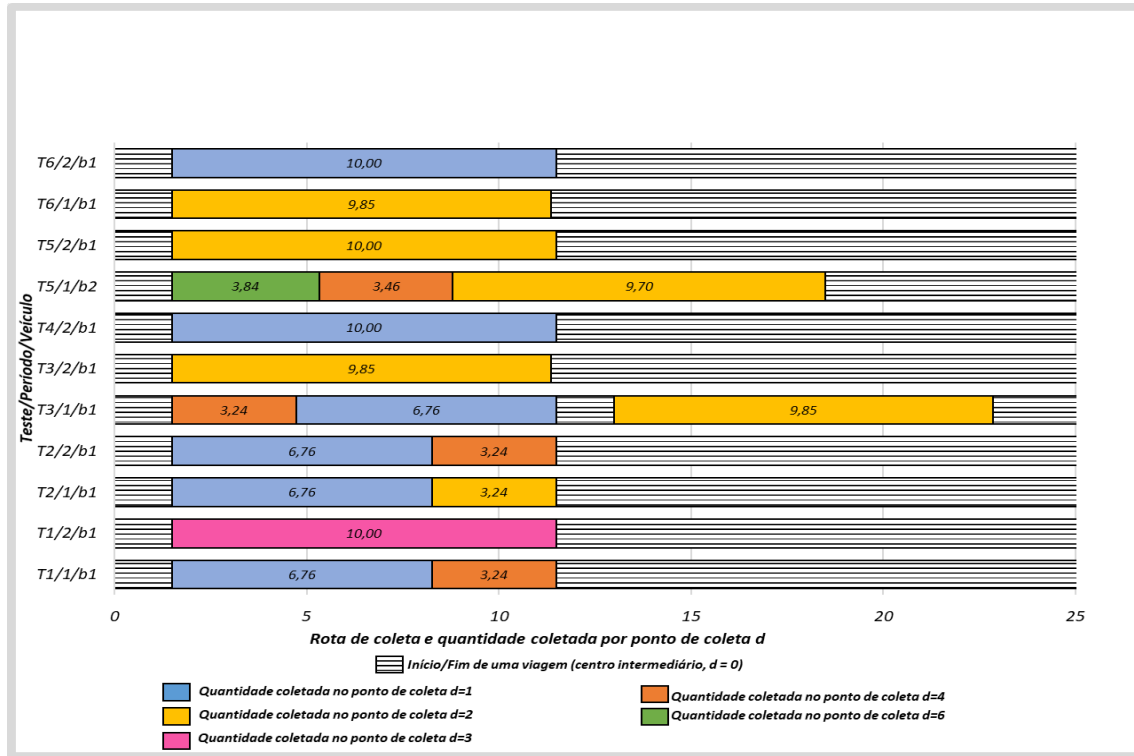
Ao comparar os resultados dos testes realizados utilizando o método WGP com o LGP, verifica-se que os resultados obtidos com todos os testes que utilizaram o método WGP, foram iguais aos resultados obtidos com a sequência de prioridades P4. Observa-se, ainda, que o aumento da coleta está associado ao aumento dos custos e/ou da distância percorrida. Neste caso, o gestor deverá decidir a melhor opção para a situação vivenciada pela empresa.

3.3.7 Coleta, Produção, Estoque e Demanda: WGP X (LGP - PS1) X (LGP - PS5)

Como, em geral, as empresas fazem o planejamento conforme a meta de previsão de gastos, foram considerados os testes realizados com as prioridades PS1 e PS5 do método LGP, que apresentaram

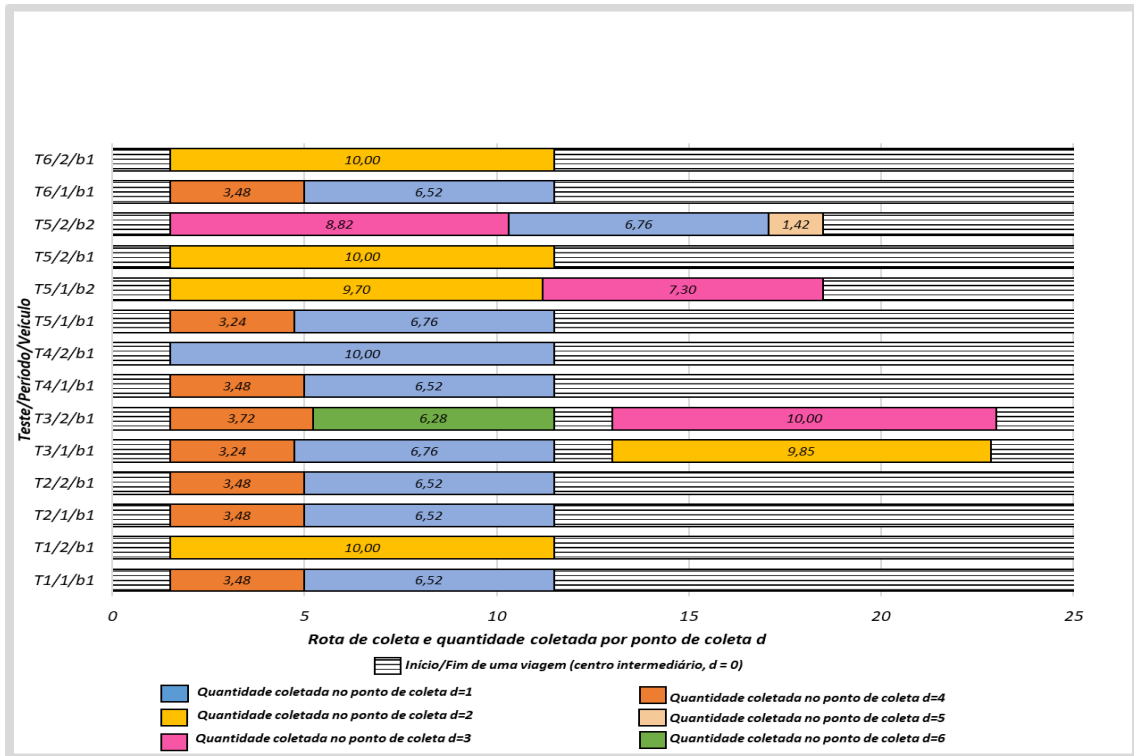
resultados diferentes para Z_1 , além dos testes realizados com o WGP. Foram analisadas as quantidades coletadas por ponto de coleta e as rotas ótimas obtidas em cada teste, que estão apresentadas nas Figuras 30, 31 e 32. As Figuras 33 e 34 apresentam, ainda, as quantidades de material entregues por fornecedores e as quantidades armazenadas de fardos ao final de cada período.

Figura 30 – Rota e quantidade coletada por ponto de coleta d - PS1



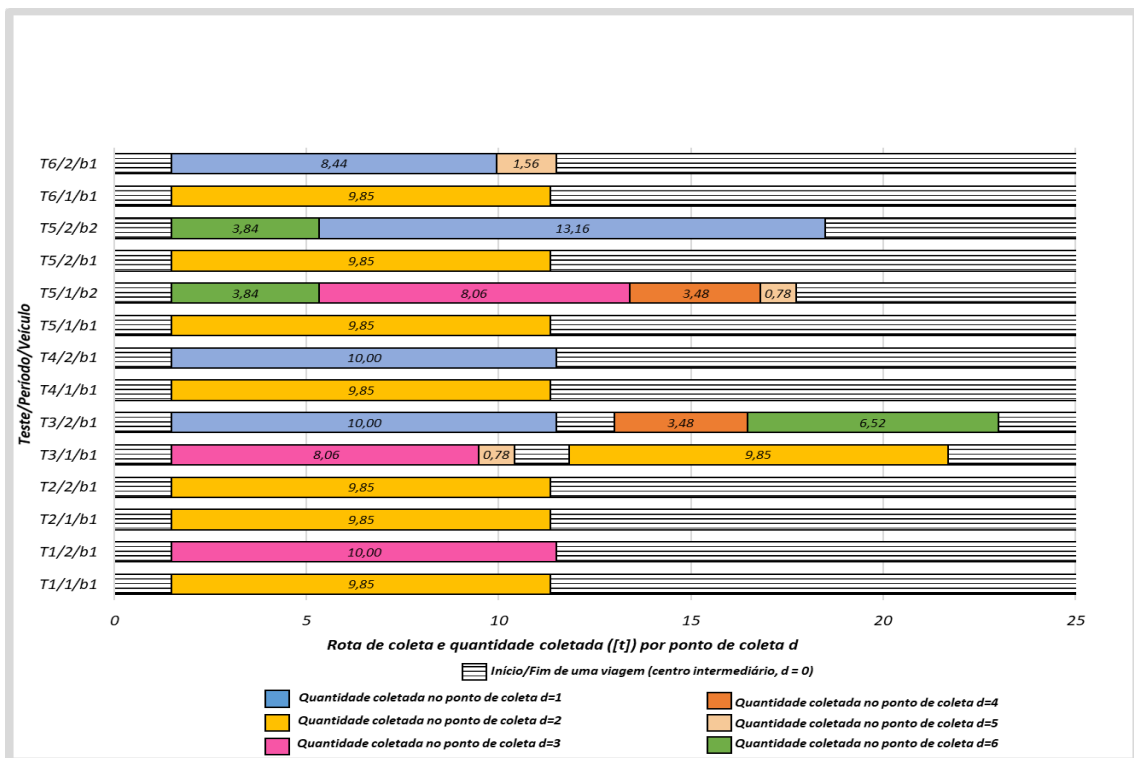
Fonte: preparado pelo autor

Figura 31 – Rota e quantidade coletada por ponto de coleta *d* - PS5



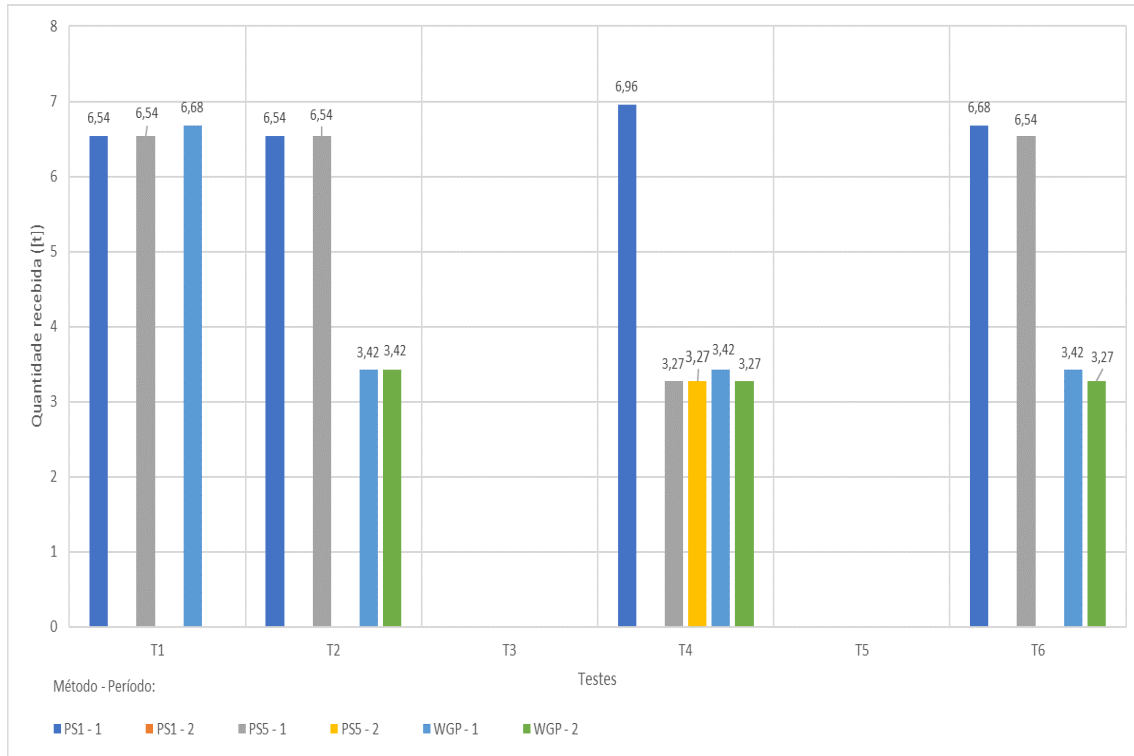
Fonte: preparado pelo autor

Figura 32 – Rota e quantidade coletada por ponto de coleta *d* - WGP



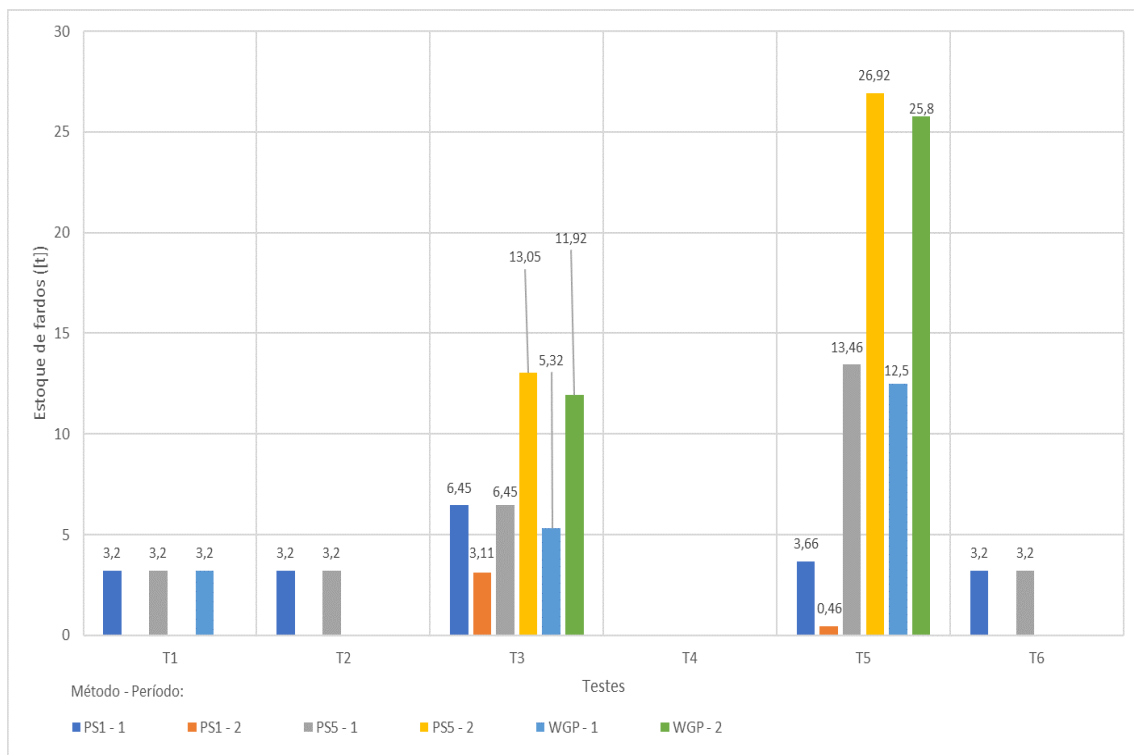
Fonte: preparado pelo autor

Figura 33 – Quantidade entregue pelos fornecedores



Fonte: preparado pelo autor

Figura 34 – Estoque de fardos



Fonte: preparado pelo autor

Nas Figuras 30, 31 e 32 alguns pontos gerais são destacados a seguir. Verifica-se que, com a

impossibilidade de armazenamento de material nos pontos de coleta ($kpc_{dt} = 0$), as rotas foram diferentes entre T1 e T2. Nas seções anteriores, ao comparar T2 a T1, verificou-se valores maiores de Z_6 associados a um aumento de Z_7 (em WGP) e valores iguais para Z_6 associados a um aumento do desvio em relação à meta de quantidade coletada de material em cada ponto de coleta (Z_8 em LGP), ocasionando diferenças entre as rotas .

Ao comparar os testes T3 e T1, observa-se que o aumento do número de viagens em T3 ocasionou uma diminuição do desvio em relação à coleta ao longo do horizonte de planejamento (Z_6). Verificou-se ainda alterações de Z_6 associadas também a variações de Z_1 e Z_7 .

Em T4, o custo reduzido fez com que ou a quantidade coletada fosse menor, se comparado à T1, em PS1, ou a quantidade coletada fosse a mesma, mas com um aumento do desvio associado à previsão de gastos (WGP e PS5).

No que se refere ao teste T5, com o aumento do número de veículos e, conseqüentemente, da capacidade de transporte em comparação à T1 (aumento de 17 t), houve uma diminuição do desvio em relação à quantidade coletada de material ao longo do horizonte de planejamento. Entretanto, ao comparar os resultados do teste T5 ao teste T3, observou-se que, apesar de uma capacidade de coleta maior em T5 (27 t por período, referente à capacidade dos dois veículos em T5 e 20 t por período, referente às duas viagens possíveis do veículo disponível), em PS1 a quantidade coletada foi maior em T3 do que em T5. Para uma melhor análise dos resultados, a rota ótima obtida em T3 foi fixada em T5.

Verificou-se um aumento de 6,82 t, da soma dos desvios associados à quantidade coletada por veículo ($(\sum_{b \in B} \sum_{t \in T} dv_{b1t}^- \approx 6,82 + 0,3)$) devido à capacidade de 17 t do veículo b_2 , associada ao limite de previsão de gastos (Od), o que ocasionou um aumento do valor de Z_s em T5 quando comparado à T3. PS5 e WGP apresentaram uma diminuição de Z_6 em T5 em relação à T1, mas também aumentos de Z_1 e de Z_8 . Portanto, a solução ótima de T3 é solução viável de T5, mas não é solução ótima.

No teste T6, em PS1, verifica-se que a quantidade coletada ao longo do horizonte de planejamento foi menor se comparada à quantidade coletada em T1. Em WGP e PS5, a quantidade coletada de material foi mantida em relação à T1, mas em PS5 houve aumento de Z_2 . Observa-se que os resultados de T6 em WGP se aproximam dos resultados deste teste em PS1. Entretanto, apesar dos resultados dos desvios terem sido iguais, verifica-se pequenas diferenças nas quantidades coletadas em cada ponto de coleta e nas rotas de coleta (Figuras 30 e 32). Para verificar se a solução ótima de um modelo é solução ótima para o outro, as quantidades coletadas em PS1, T6, foram fixadas em WGP, T6, e vice-versa. Os resultados dos desvios foram os mesmos, o que mostra similaridades entre os modelos e que há mais de uma solução ótima.

Ainda com base nas Figuras 30, 31 e 32, verifica-se que em T4, sequência PS1, por exemplo, só houve coleta no período 2 (Figura 30). Já em PS5 e WGP houve coleta nos dois períodos (Figuras 31 e 32). Destaca-se, ainda, nos testes T3 a T6, uma quantidade coletada em PS1 menor ou igual aos resultados obtidos em PS5 ou aos resultados obtidos utilizando o método WGP, devido à sequência das prioridades em PS1.

Na Figura 33 observa-se que a quantidade entregue de material está diretamente relacionada à coleta de material, ao atendimento à demanda e à meta de gastos. Observa-se, por exemplo, em T4,

prioridade PS1, que com a diminuição da meta de custos, a quantidade coletada foi reduzida, pois aumenta, por exemplo, os custos de estoque e transporte. Assim, o desvio em relação à quantidade vendida de material (Z_4) só não foi maior devido ao aumento da quantidade recebida de material.

Assim, estes resultados mostram prioridade na diminuição dos estoque por período, focando, assim, no recebimento apenas da quantidade necessária de material para atendimento à demanda por período. Observa-se, ainda, que devido às limitações de gastos, T4 foi o único teste que não apresentou estoque de material em qualquer período, conforme apresentado na Figura 34.

Na Figura 33, verifica-se nos testes T3 e T5 que o aumento da quantidade coletada fez com que a quantidade entregue de material pelos fornecedores fosse nula.

Em resumo, os testes com exemplares ilustrativos, executados para um melhor entendimento do modelo, mostraram coerência entre os resultados em comparação com o cenário real estudado. As variações das prioridades consideradas no modelo LGP apontaram que tais alterações influenciam as soluções. Em se tratando dos resultados obtidos com o método WGP, estes foram iguais aos resultados obtidos com a sequência de prioridades P4.

Apesar das diferenças entre os resultados obtidos, principalmente em relação às rotas, coleta e entrega de material, observou-se similaridades entre os métodos, indicando diferentes possibilidades de soluções ótimas. Portanto, os resultados dos testes realizados com os exemplares ilustrativos mostraram que os modelos retratam várias situações vivenciadas pelas empresas do ramo.

4 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS COM DADOS REAIS

Nesta seção, serão apresentados testes com exemplares gerados com base em dados reais fornecidos pela empresa A. Foram usados os dados diários, associados às demandas, custos (estoque, aquisição de material, com e sem coleta, e transporte), meta de previsão de gastos, capacidade operacional, capacidade de estoque, quantidade de material disponível para coleta e quantidade entregue de material pelo fornecedor. Os dados relacionados aos tipos de materiais, quantidade de veículos, fornecedores e clientes também foram fornecidos pela empresa e as distâncias entre os pontos de coleta ([km]) foram estimadas utilizando-se a biblioteca *gmapsdistance* do software R (MELO; RODRIGUEZ T; ZARRUK, 2018).

A partir de informações fornecidas pela empresa, os dados referentes às capacidades de carga dos veículos foram obtidos por meio de consultas realizadas em Brasil. Ministério da Infraestrutura. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2009) e Couto (2016). Conforme apresentado no Quadro 14, identificou-se 9 veículos com capacidade de até 17 t, 1 veículo com capacidade de carga de até 16,6 t, 1 veículo com capacidade de 8,9 t, 1 veículo de capacidade máxima de 9,5 t, 2 veículos com capacidade de até 4,5 t e 1 veículo com capacidade máxima de 0,62 t. Conforme informações fornecidas pela empresa, há pelo menos um motorista para cada veículo.

Quadro 14 – Capacidades dos veículos utilizados pela empresa

Tipos de veículos	Capacidade ([t])
b_1	17
b_2	16,6
b_3	17
b_4	8,9
b_5	17
b_6	17
b_7	17
b_8	9,5
b_9	17
b_{10}	17
b_{11}	17
b_{12}	17
b_{13}	4,5
b_{14}	4,5
b_{15}	0,62

Fonte: dados da empresa A e informações obtidas em Brasil. Ministério da Infraestrutura. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2009) e Couto (2016)

Os testes foram realizados considerando-se dados de 6 dias disponibilizados pela empresa, conforme detalhado no Quadro 15. Para o primeiro exemplar, os valores das metas foram considerados mais relaxados com o objetivo de se obter um melhor resultado na comparação com os dados reais. Posteriormente, com base em entrevistas realizadas com os gestores, outros testes foram realizados com variações dos parâmetros do exemplar R1, conforme descrito no Quadro 16.

No exemplar R1, a previsão de custos foi estimada com base nos dados fornecidos. Os custos totais considerados incluem os custos de estoque, de compra de material, custos com descarte de material não-relevante para reciclagem, custos com entrega de material (frete) e os custos com transporte (coleta de material). O custo de estoque para este horizonte de planejamento analisado foi estimado considerando-se a diferença entre a demanda e a quantidade adquirida de material relevante, obtidos dos dados fornecidos pela empresa. Os custos totais de transporte, frete e custos com descarte de lixo foram estimados proporcionalmente à quantidade coletada.

Os custos totais de transporte foram calculados com base em informações relacionadas aos custos com motoristas (como estimativa média de pagamento e alimentação), custos de manutenção de veículos, impostos, multas, seguros e custos com combustível. O custo de transporte por km, considerado na modelagem, foi estimado considerando-se o gasto total com combustível fornecido pela empresa, o preço de R\$ 3,641 do litro do diesel (com base em dados disponíveis em Brasil. Ministério de Minas e Energia (2020)) e o consumo médio de 3 km/l por veículo, conforme informações de especialistas.

Quadro 15 – Valores dos parâmetros para o exemplar R1

Índices e parâmetros	Dados
$ T $	6
$ B $	15
$ D $	83
$ I $	18
$ V $	1
$ C $	23
$ F $	75
π	Igual à quantidade total disponível para coleta ($\sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} kh_{idt}$).
ktm_{bvt}	Igual ao mínimo coletado no período 0,06t.
khm_{dbvt}	Igual ao mínimo coletado no período 0,06t.
Od	R\$634.688,88
l_{bvt}	$l_{bv1} = 205,95 \text{ km}$, $l_{bv2} = 135,60 \text{ km}$, $l_{bv3} = 212,32 \text{ km}$, $l_{bv4} = 196,30 \text{ km}$, $l_{bv5} = 155,60 \text{ km}$, $l_{bv6} = 112,77 \text{ km}$, resultado do modelo auxiliar.
χ_i	Igual à demanda de fardos do material i ao longo do horizonte de planejamento ($\sum_{c \in C} \sum_{t \in T} dp_{ict}$).
λ_{it}	Igual à demanda de fardos do material i , do cliente c , no período t (dp_{ict}).
φ_t	Igual a $0,01 \times (\sum_{i \in I} qt_{it}(1 - w_{it}) + en_{it-1} - en_{it})$.
kh_{idt}	[0,06 t ; 18,18 t]
$\sum_{i \in I} kpc_{idt}$	Ilimitado para todo ponto de coleta d em cada período t
kt_b	Capacidades disponíveis no Quadro 14
dt_{dj}	[0,065 km; 61,708 km]
cq_{idt}	[R\$ 200,00/t; R\$ 1.500,00/t]
kd	menor valor de kh_{idt} (0,06 t)
ck	R\$1.000,00/t
w_i	Calculado com base nos dados fornecidos.
ken	200 t (estimado com base em entrevista com os gestores e nos dados fornecidos)
kef	1000 t (estimado com base em entrevista com os gestores e nos dados fornecidos)
ko_t	200 t (estimado com base em entrevista com os gestores e nos dados fornecidos)
dp_{ict}	[0,32 t; 82,81 t]
h_i	[R\$ 190,00/t ; R\$1.260,00/t]
ct	R\$13,95/km (estimado com base nos dados reais)
cf_{ift}	[R\$ 200,00/t; R\$ 1.500,00/t]
fr_c	R\$21,96/t (média do valor de frete estimado com base nos dados reais)
en_{i_0}	0 t
ef_{i_0}	0 t
κ_{ift}	0 t
η_{ift}	[0,002 t; 14,99 t]
qr_{ift}	Igual a η_{ift} , $\forall i, f, t$
α_p	igual a 1 $\forall p$

Fonte: preparado pelo autor com base em dados reais

Quadro 16 – Testes realizados com dados reais

Testes	Alterações em relação ao Quadro 15	Explicações das alterações
R1	-	
R2	R1 com $ef_{0i_1} = 36,44 t$, $ef_{0i_2} = 267,204 t$, $ef_{0i_5} = 18,924 t$, $ef_{0i_8} = 18,657 t$, $ef_{0i_{11}} = 24,82 t$, $ef_{0i_{15}} = 0,84 t$, $ef_{0i_{17}} = 6,39 t$	Considerar fardos em estoque no início do horizonte de planejamento.
R3	R2 com $Od = R\$703.774,20$	Incluir os custos iniciais de estoque para verificar as diferenças entre coleta e venda de fardos.
R4	R1 com $\lambda_{ict} = dp_{ict} + df_{ic,t-1}^-$	Forçar o atendimento à demanda de fardos por período.
R5	R3 com $\lambda_{ict} = dp_{ict} + df_{ic,t-1}^-$	Forçar o atendimento à demanda de fardos por período considerando os custos iniciais de estoque.
R6	R5 com $qr_{ift} \leq \eta_{ift}, \forall i, f, t$	Auxiliar o planejamento ao considerar a desigualdade no limitante superior referente a quantidade recebida. Apesar da alta demanda de fardos, o estoque disponível pode limitar a capacidade de armazenamento do material recebido.
R7	R5 com $ktm_{bvt} = 0,2 \times kt_b$ e $khm_{dbvt} = 2t, \forall d, b, v, t$	Diminuir a diferença entre a quantidade coletada de material e a capacidade de coleta, para evitar prejuízo.
ER1 a ER7	R1 a R7 com $kpc_{dt} = 0, \forall d, t$	Considerar o armazenamento de material nos pontos de coleta nos testes R1 a R7

Fonte: preparado pelo autor.

Os testes com dados reais apresentados neste capítulo foram realizados com a utilização de dois métodos: a Programação por Metas Lexicográfica (LGP) e a Programação por Metas Ponderada (WGP) normalizada.

Na próxima seção serão apresentados os resultados realizados utilizando o WGP normalizado. Na seção seguinte será explicada a organização das prioridades para a realização dos testes com o LGP e também serão apresentados os resultados dos testes.

4.1 TESTES REALIZADOS COM O MÉTODO WGP NORMALIZADO

As Tabelas 4 e 5 apresentam os valores obtidos, juntamente com o valor do *GAP*, dado em porcentagem, que corresponde à diferença entre o limite superior (valor da solução viável) e o limite inferior (valor da relaxação linear). A nomenclatura utilizada para os testes foi “WR” para os testes que consideraram a possibilidade de armazenamento de material nos pontos de coleta e “WER” caso

contrário. Ou seja, WR3 e WER4, por exemplo, foram os testes R3 e ER4 realizados considerando o método WGP.

Tabela 4 – Resultados dos testes realizados considerando o método WGP

Testes	$Z_1([R\$])$	$Z_2([km])$	$Z_3([t])$	$Z_4([t])$	$Z_5([t])$	$Z_6([t])$	$Z_7([t])$	$Z_8([t])$	GAP
WR1	0	0	373,275	270,462	0	0	0	0	0,00%
WR2	0	0	40,881	0	0	74,705	0	0	100%
WR3	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00%
WR4	0	0	1.278,641	270,462	0	0	0	0	0,00%
WR5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00%
WR6	0	13,44	1,024	0	0	6,672	0	0	100%
WR7	0	0	5,133	0	0	20,892	0	0	0,71%

Fonte: preparado pelo autor.

Tabela 5 – Resultados dos testes realizados considerando o método WGP e $kpc_{dt} = 0, \forall d, t$

Testes	$Z_1([R\$])$	$Z_2([km])$	$Z_3([t])$	$Z_4([t])$	$Z_5([t])$	$Z_6([t])$	$Z_7([t])$	$Z_8([t])$	GAP
WER1	0	0	373,275	270,462	0	0	0	0	0,00%
WER2	0	0	0	0	0	1,286	0	0	100%
WER3	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00%
WER4	0	0	1.278,641	270,462	0	0	0	0	0,00%
WER5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00%
WER6	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00%
WER7	0	0	36,819	0	0	106,102	0	0	0,00%

Fonte: preparado pelo autor.

Ao comparar os resultados apresentados nas Tabelas 4 e 5, verifica-se que devido à quantidade de variáveis e restrições, há uma dificuldade maior para encontrar a solução ótima nos testes que consideraram a possibilidade de armazenamento de material nos pontos de coleta. Sob o ponto de vista gerencial, destaque para os testes “R7”, cujos resultados indicam que o gestor pode, por exemplo, decidir coletar menos (Z_6) e respeitar a meta de coleta por ponto de coleta (Z_8).

4.2 TESTES REALIZADOS COM O MÉTODO LGP

Para a realização dos testes utilizando o método LGP, as prioridades foram organizadas de acordo com as unidades de medida das metas. Seja $Z_s = Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8$. Os testes foram organizados considerando-se variações de ordem de prioridades de Z_1 , Z_2 e Z_s conforme mostra o Quadro 17. Estes desvios estão associados a metas cujas grandezas possuem como unidades de medida $[R\$]$, $[km]$ e $[t]$, respectivamente. A prioridade do tipo “L1”, por exemplo, é aquela cuja ordem de otimização considerada foi: Z_1, Z_2, Z_s .

Quadro 17 – Prioridades conforme as grandezas das metas

Prioridades de otimização	Organização das prioridades
L1	Z_1, Z_2 e Z_s
L2	Z_2, Z_1 e Z_s
L3	Z_1, Z_s e Z_2
L4	Z_2, Z_s e Z_1
L5	Z_s, Z_1 e Z_2
L6	Z_s, Z_2 e Z_1

Fonte: preparado pelo autor.

4.2.1 Resultados dos testes considerando as sequências de prioridades L1 e L2

Os testes realizados com as sequências L3 à L6 não retornaram soluções viáveis dentro do tempo de processamento considerado.

Por meio de observações realizadas durante as visitas técnicas, verificou-se que, em geral, o planejamento das empresas é feito com base na previsão de gastos. Portanto, o tempo de processamento não foi estendido e serão apresentados apenas os testes realizados com as sequências L1 e L2.

Os resultados obtidos com as sequências L1 e L2 foram iguais. As Tabelas 6 e 7 apresentam os valores juntamente com o valor do *GAP*, dado em porcentagem. As nomenclaturas utilizadas foram LR para os testes que consideraram a possibilidade de armazenamento de material nos pontos de coleta e LER caso contrário. Ou seja, LR3, por exemplo, foi o teste R3 realizado considerando as sequências L1 e L2 e LER4 foi o teste ER4 realizado considerando as sequências L1 e L2.

Tabela 6 – Resultados dos testes realizados considerando as prioridades L1 e L2

Testes	Z_1 ([R\$])	Z_2 ([km])	Z_3 ([t])	Z_4 ([t])	Z_5 ([t])	Z_6 ([t])	Z_7 ([t])	Z_8 ([t])	<i>GAP</i>
LR1	0	0	373,275	270,462	0	0	0	0	0,00%
LR2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00%
LR3	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00%
LR4	0	0	1.278,641	270,462	0	0	0	0	0,00%
LR5	0	0	0	0	0	0,912	0	0	100%
LR6	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00%
LR7	0	0	0,638	0	0	2,924	0	5,657	100%

Fonte: preparado pelo autor.

Tabela 7 – Resultados dos testes realizados considerando as prioridades L1 e L2 e $kpc_{dt} = 0, \forall d, t$

Testes	Z_1 ([R\$])	Z_2 ([km])	Z_3 ([t])	Z_4 ([t])	Z_5 ([t])	Z_6 ([t])	Z_7 ([t])	Z_8 ([t])	<i>GAP</i>
LER1	0	0	373,275	270,462	0	0	0	0	0,00%
LER2	0	0	0	0	0	0,3824	0	0	100%
LER3	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00%
LER4	0	0	1.278,641	270,462	0	0	0	0	0,00%
LER5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00%
LER6	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00%
LER7	0	0	0,908	0	0	12,564	0	34,462	0,00%

Fonte: preparado pelo autor.

Ao comparar os resultados apresentados nas Tabelas 6 e 7, verifica-se que, de forma similar aos resultados obtidos com método WGP, devido à quantidade de variáveis e restrições, observa-se uma dificuldade maior para encontrar a solução ótima nos testes que consideraram a possibilidade de armazenamento de material nos pontos de coleta. Sob o ponto de vista gerencial, destaque novamente para os testes “R7”, cujos resultados indicam que o gestor pode, por exemplo, priorizar a minimização da capacidade ociosa do veículo durante a coleta.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS MODELOS LGP, WGP E OS DADOS REAIS

A Tabela 8 apresenta a dimensão de cada problema por meio do número de variáveis e do número de restrições de cada teste e a Tabela 9 apresenta estes números após o *presolve*. A Figura 35 ilustra os tempos de processamento dos testes. Em se tratando dos testes realizados com o método LGP, o tempo considerado foi o da última etapa da sequência.

Tabela 8 – Dimensões dos problemas

Testes	Número total de variáveis	Número de variáveis discretas	Número de restrições
<i>LR1, LR4</i>	2.051.247	1.764.000	1.889.321
<i>LR2, LR3, LR5 a LR7</i>	2.043.153	1.764.000	1.881.227
<i>WR1, WR4,</i>	2.051.247	1.764.000	1.889.319
<i>WR2, WR3, WR5 a WR7</i>	2.043.153	1.764.000	1.881.225
<i>LER1, LER4</i>	2.051.247	1.764.000	1.890.155
<i>LER2, LER3, LER5 a LR7</i>	2.043.153	1.764.000	1.882.061
<i>WER1, WER4</i>	2.051.247	1.764.000	1.890.153
<i>WER2, WER3, WER5 a WER7</i>	2.043.153	1.764.000	1.882.059

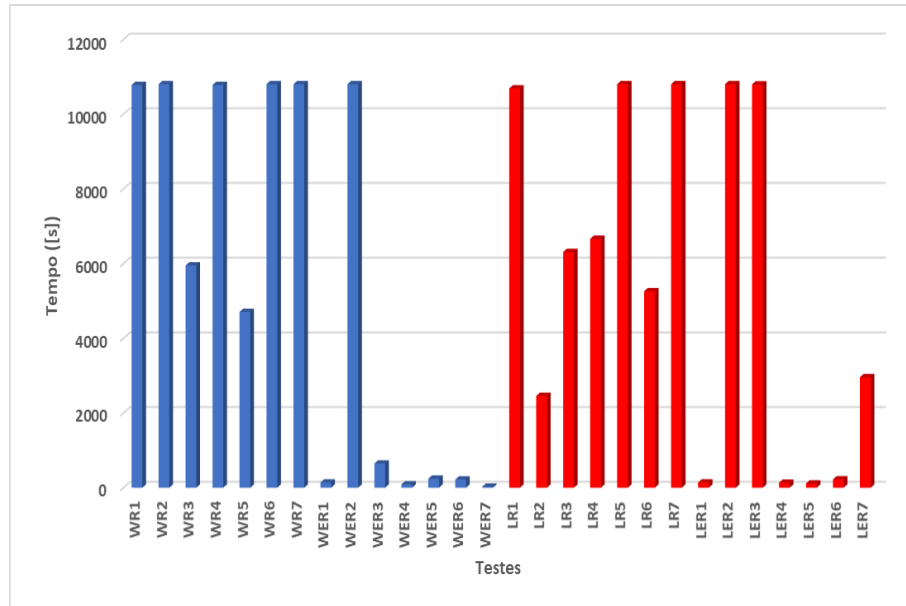
Fonte: preparado pelo autor.

Tabela 9 – Dimensões dos problemas após o *presolve*

Testes	Número total de variáveis	Número de variáveis discretas	Número de restrições
<i>LR1</i>	443.011	420.390	444.913
<i>WR1</i>	443.102	420.390	444.913
<i>LR2, LR3</i>	443.304	420.390	445.467
<i>WR2, WR3,</i>	443.149	420.390	444.941
<i>LR4</i>	443.074	420.390	444.976
<i>WR4</i>	443.165	420.390	444.976
<i>LR5, LR7</i>	443.379	420.390	445.542
<i>WR5, WR7</i>	443.224	420.390	445.016
<i>LR6</i>	443.539	420.390	445.544
<i>WR6</i>	443.384	420.390	445.018
<i>LER1</i>	86.778	80.145	88.576
<i>WER1</i>	86.869	80.145	88.576
<i>LER2, LER3</i>	86.825	80.145	88.604
<i>WER2, WER3</i>	86.916	80.145	88.604
<i>LER4</i>	86.841	80.145	88.639
<i>WER4</i>	86.932	80.145	88.639
<i>LER5</i>	86.900	80.145	88.679
<i>WER5</i>	86.991	80.145	88.679
<i>LER6</i>	87.055	80.145	88.681
<i>WER6</i>	87.146	80.145	88.681
<i>LER7</i>	89.435	80.145	91.214
<i>WER7</i>	89.526	80.145	91.214

Fonte: preparado pelo autor.

Figura 35 – Tempo de execução - Testes realizados com os métodos LGP e WGP



Fonte: preparado pelo autor

Observa-se que alguns valores de GAP encontrados tanto nos testes cujo método utilizado foi o WGP quanto naqueles cujo método utilizado foi o LGP foram iguais a 100%, dentro do limite de 10.800 segundos. Isto aconteceu devido ao valor zero encontrado para a solução inteira e mantido até o término do tempo limite do processamento. Assim, para uma solução inteira igual a zero, qualquer valor maior do que zero da solução viável fará com que o valor do GAP seja de 100%.

Em R1 e ER1, os valores considerados para l_{but} foram aqueles obtidos por meio do modelo auxiliar (Apêndice D). Verifica-se que as soluções ótimas foram encontradas em todos os testes. Observou-se o não atendimento à demanda por período ($Z_3 > 0$) e ao longo do horizonte de planejamento ($Z_4 > 0$) devido à diferença entre a quantidade disponível de resíduos e à demanda. Por esse motivo, um estoque inicial foi considerado nos testes R2.

Em R2 e ER2, observa-se $Z_4 = 0$ em todos os testes, mas a solução ótima só foi encontrada dentro do limite estabelecido de 10.800 segundos no teste LR2 e todas as soluções viáveis obtidas (que não são ótimas) apresentaram valores de Z_6 diferentes de zero.

Em R3 e ER3, ao considerar o custo deste estoque inicial ao longo do horizonte de planejamento (calculado considerando-se a demanda diária e a quantidade de material mantido em estoque no período), verifica-se também uma diminuição dos desvios em todos os testes.

Observou-se nos testes que o mínimo de Z_3 não necessariamente atende à demanda por período, já que Z_3 corresponde à soma do desvio negativo em relação à quantidade de fardos de material i , entregue para o cliente c , no período t .

Por exemplo, seja a demanda de c_1 , no período 1, do item i_1 , igual a 1 t e, no período 2, igual a 2 t. Seja ainda a quantidade de material relevante i_1 adquirido no período 1 igual a 1 t e no período 2 igual a 1 t. Se a demanda for satisfeita total ou parcialmente em todos os períodos, respeitando a quantidade de material adquirido, tem-se: $1 - 1 = 0$; $1 - 2 = -1$, totalizando então um desvio de 1 t. Entretanto, se a demanda for satisfeita apenas no período 2, mantendo-se o material adquirido no primeiro período em

estoque (considerando-se que há capacidade e a previsão de custos não sofrerá desvio), haverá desvio no primeiro período (1 t) e não haverá desvio no segundo período (0 t), totalizando uma soma de 1 t também.

Como uma possível solução quando o atendimento à demanda por período for necessária, a meta $\lambda_{ict} = dp_{ict}$ em R1 foi substituída por $\lambda_{ict} = dp_{ict} + df_{ict-1}^-$ em R4. Desta forma, a minimização do desvio no período (df_{ict}^-) dependerá da minimização do desvio do período anterior e, em consequência, também a minimização do somatório destes desvios. As Tabelas 10 e 11 ilustram as diferenças entre os valores de df_{ict}^- .

Tabela 10 – Valores de df_{ict}^- - Teste WER1

Item	Cliente	df_{ict}^- ([t])					
		1	2	3	4	5	6
i_1	c_{14}	0	0	21,06	15,38	0	0
i_2	c_1	4,94	0	0	2,14	0	0
i_2	c_2	14,2	0	0	0	0	0
i_2	c_4	14,99	21,837	0	30,42	0	0
i_2	c_8	0	32,95	48,727	0	0	0
i_2	c_9	0	42,42	16,1	13,45	0	0
i_2	c_{12}	0	25,03	0	0	0	0
i_5	c_3	13,443	0	0	0	0	0
i_5	c_5	0	4,201	0	0	0	0
i_5	c_{11}	0	1,28	0	0	0	0
i_8	c_1	6,61	3,37	0	0	0	0
i_8	c_{12}	0	0	8,677	0	0	0
i_{11}	c_6	0	11,56	0	0	0	0
i_{11}	c_{17}	0	0	0	13,26	0	0
i_{15}	c_1	0	0	0	0	0	0,84
i_{17}	c_1	0	6,39	0	0	0	0

Fonte: preparado pelo autor.

Tabela 11 – Valores de $df_{ic t}^-$ - Teste WER4

Item	Cliente	$df_{ic t}^-$ ([t])					
		1	2	3	4	5	6
i_1	c_{14}	0	0	21,06	36,44	36,44	36,44
i_2	c_1	0	0	0	2,14	2,14	2,14
i_2	c_4	0	36,771	0	30,42	59,299	59,299
i_2	c_8	0	32,95	68,308	79,954	79,954	55,21
i_2	c_9	0	0	16,1	29,55	29,55	29,55
i_2	c_{12}	0	0	0	82,81	0	0
i_2	c_{13}	0	42,33	42,33	42,33	42,33	42,33
i_5	c_3	2,284	2,284	2,284	2,284	2,284	2,284
i_5	c_5	0	7,699	7,699	7,699	7,699	7,699
i_5	c_{11}	0	8,941	0	4,74	3,46	3,46
i_8	c_1	2,88	0	0	2,74	0	0
i_8	c_{12}	0	0	18,657	13,899	0	0
i_{11}	c_6	0	11,12	11,12	11,12	11,12	11,12
i_{11}	c_{17}	0	0	0	13,7	13,7	13,7
i_{15}	c_1	0	0	0	0	0	0,84
i_{17}	c_1	0	6,39	6,39	6,39	6,39	6,39

Fonte: preparado pelo autor.

Observa-se, por exemplo no período 1, que os desvios de i_2 , i_5 e i_8 são menores em WER4 do que em WER1. Desta forma, o estoque diário em WER4 é menor do que em WER1 e, conseqüentemente, os custos de estoque também são menores em WER4, o que será discutido na próxima seção.

Em R1, como os valores de $df_{ic t}^-$ não são acumulativos, para saber se houve desvio em relação à entrega por item ao longo do horizonte de planejamento, devem ser verificados os valores de dq_i^- . Em contrapartida, em R4, o valor de $\sum_c df_{ic 6}^-$, $\forall i$, ou seja, a soma, em relação aos clientes, dos desvios, para cada item, ao final do horizonte de planejamento, será igual aos valores de dq_i^- .

Em R4 e ER4, tanto os testes realizados com o método WGP quanto os testes que utilizaram o método LGP apresentaram valores de Z_3 maiores do que os valores encontrados em R1 e ER1. Ao considerar um estoque inicial em R5 e ER5, e o custo deste estoque inicial, os valores de Z_3 foram iguais zero.

Em R6 e ER6, foi considerada a possibilidade de não recebimento de material ($qr_{ift} \leq \eta_{ift}$, $\forall i, f, t$), o que pode acontecer, por exemplo, em situações de estoque elevado e/ou baixa demanda.

Uma das dificuldades identificadas foi a ociosidade durante a coleta. Em relação à capacidade do veículo, muitas vezes, pouco material é coletado nos pontos de coleta o que pode acarretar custos altos. Portanto, para os testes R7 e ER7 foram consideradas como metas de coleta de material pelo menos 20% da capacidade de coleta de cada veículo, em cada viagem, em cada período, e no mínimo 2 t por ponto de coleta.

Verifica-se, de uma forma geral, que ao estabelecer estas metas, o desvio em relação à quantidade de material coletado por ponto de coleta (Z_8) foi diferente de zero nos testes cujo método lexicográfico foi utilizado, além do desvio em relação à quantidade coletada ao longo do horizonte de planejamento (Z_6) e do desvio associado ao atendimento à demanda por cliente por item e por período (Z_3). Em particular, nos testes com $kpc_{dt} = 0$, $\forall d, t$, os valores dos desvios foram maiores devido à impossibilidade de acúmulo de material de um período para outro para posterior coleta. Em se tratando dos testes

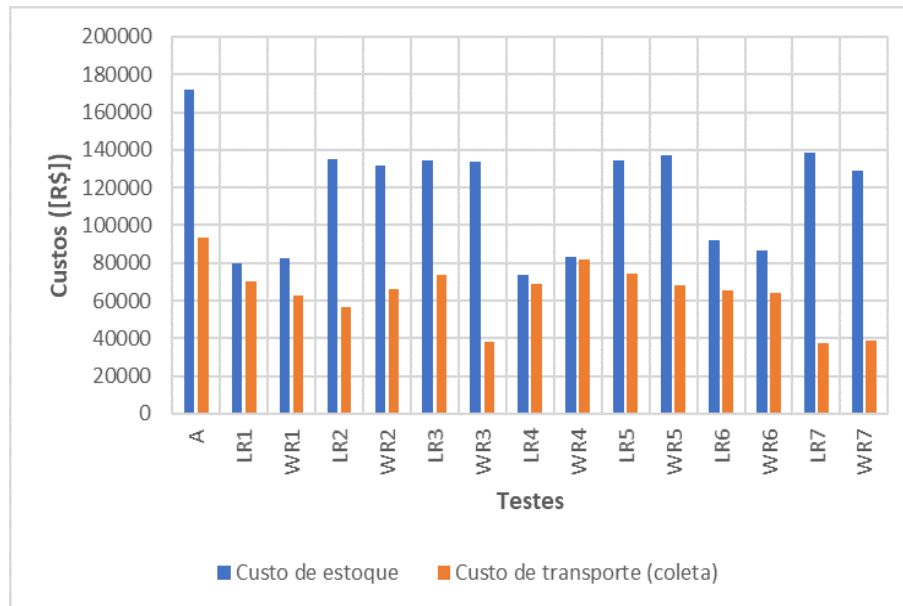
realizados com o método WGP, os valores de Z_8 foram iguais a zero, mas os valores de Z_3 e Z_6 foram maiores do que os encontrados com a utilização do método LGP.

Sob o ponto de vista gerencial, os resultados obtidos com os testes R7 apontam possibilidades de escolha para o gestor. Se a prioridade for a coleta, a melhor opção são os resultados obtidos com o método LGP. Já se a prioridade for respeitar a meta de coleta por ponto de coleta, independente da quantidade coletada, a melhor opção são os resultados obtidos com o método WGP.

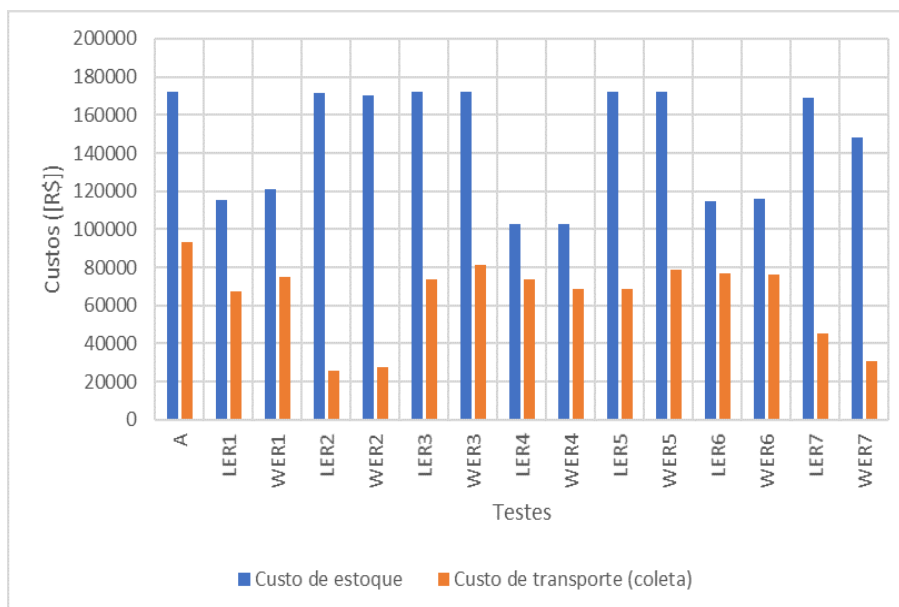
4.3.1 Custos

As Figuras 36 e 37 ilustram os custos de estoque e de coleta de material por período em cada teste. A representa os valores dos custos estimados da empresa. Observa-se que os custos de estoque nos testes R1 a R7 são menores do que nos testes ER1 a ER7, já que neste caso, não há possibilidade de armazenamento de material nos pontos de coleta. Em relação aos custos estimados da empresa, em todos os testes os custos de transporte foram menores e os custos de estoque foram no máximo iguais, como nos testes ER3 e ER5, onde um estoque inicial foi considerado para o atendimento completo à demanda em cada período, além de $qr_{ift} = \eta_{ift}, \forall i, f, t$ e $kpc_{dt} = 0$.

Figura 36 – Custos de estoque e transporte - Testes com $kpc_{dt} > 0$



Fonte: preparado pelo autor

Figura 37 – Custos de estoque e transporte - Testes com $kpc_{dt} = 0$ 

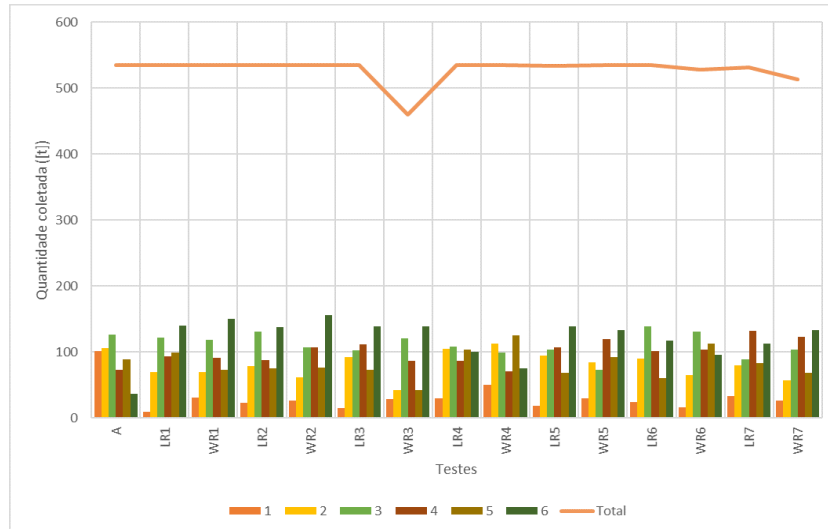
Fonte: preparado pelo autor

Observou-se durante o processamento dos testes que ao aumentar os custos de aquisição de material e de estoque, os custos de transporte são minimizados para que não haja desvio em relação à previsão de custos. Assim, a busca pela rota que minimiza os custos com transporte aumenta a dificuldade em encontrar a solução ótima. Em particular, nos testes R2 e, principalmente, WER2, a inclusão de um estoque inicial sem considerar o custo de manter uma quantidade maior de material em estoque intensificou a busca pela rota que minimiza o custo com a coleta de materiais compensando, assim, o gasto com o estoque.

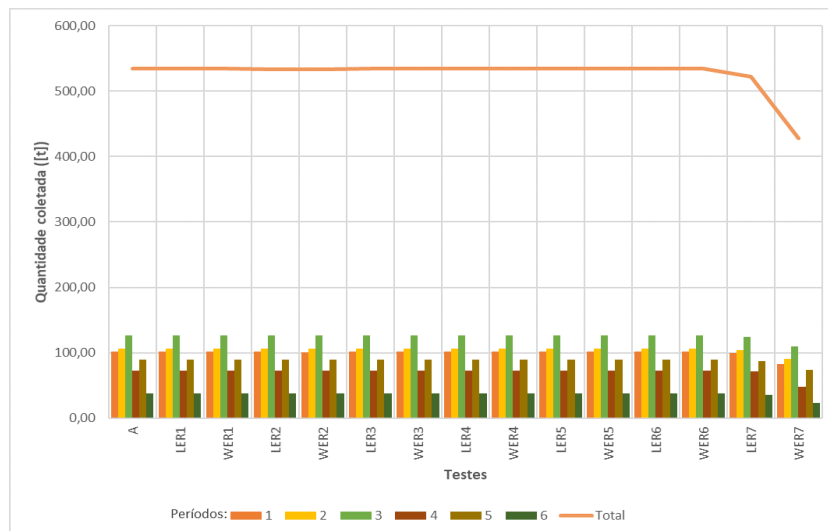
Verificou-se, ainda, que ao comparar o teste ER1 com $\lambda_{ict} = dp_{ict}$ ao teste ER4 com $\lambda_{ict} = dp_{ict} + df_{ic}^-_{t-1}$, por exemplo, ambos com previsão de gastos reduzida em relação à ER3 e ER5, os custos de estoque foram menores neste último teste, já que a alteração da meta aumentou a exigência do atendimento à demanda por período, diminuindo a quantidade de material em estoque.

4.3.2 Coleta

As Figuras 38 e 39 ilustram as quantidades coletadas em cada período, conforme o teste realizado. O símbolo A representa as quantidades coletadas pela empresa em cada período. A quantidade total coletada pela empresa é igual à 534,442 t. Para os testes que apresentaram $Z_6 = 0$ t a quantidade total coletada foi igual à quantidade real coletada. Em se tratando destes testes, apenas aqueles considerando $kpc_{dt} = 0$ t, $\forall d, t$ apresentaram a mesma quantidade por período coletada pela empresa (A).

Figura 38 – Quantidade coletada - Testes com $kpc_{dt} > 0$ 

Fonte: preparado pelo autor

Figura 39 – Quantidade coletada - Testes com $kpc_{dt} = 0$ 

Fonte: preparado pelo autor

As Tabelas 12, 13, 14 e 15 apresentam as diferenças de coleta por veículo. Os testes WR5, L1ER5 e WER5 foram selecionados por considerar parâmetros que mais se aproximam às atividades da empresa apresentando valores ótimos com $Z_6 = 0 t$.

Verifica-se que o número de viagens realizadas pela empresa, conforme Tabela 18, somam 93 ao final do horizonte de planejamento.

Nos resultados do teste WR5 (Tabela 13), verifica-se que o acúmulo de material nos fornecedores para posterior coleta possibilita uma redução de aproximadamente 23% do número de viagens (considerando a possibilidade de apenas 90 viagens). Em L1ER5 e WER5 (Tabelas 14 e 15), quando o acúmulo de material não é possível, verificou-se também uma reorganização da coleta por veículo e uma diminuição do número de viagens para 79 e 77, respectivamente. Observa-se, por exemplo, no

período 4, que, no que se refere aos dados reais, dois veículos não foram utilizados para coleta (b_1 e b_5) e um foi utilizado duas vezes no mesmo período (b_4). Em L1ER5 e WER5, 4 veículos não foram utilizados no período.

Tabela 12 – Coleta por veículo b no período t - Empresa A

Tipos de veículos (b)	Períodos (t)						Capacidades dos veículos, por viagem, por período ([t])
	1	2	3	4	5	6	
b_1	3,74	10,78	14,54	0	6,34	4,73	17
b_2	8,37	15,533	4,23	10,37	1,83	0	16,6
b_3	0,98	10,81	5,26	2,05	5,29	0	17
b_4	11,896	15,015	17,44	14,068	7,415	6,544	8,9
b_5	13,335	0	6	0	10,916	0	17
b_6	5,23	14,415	15,041	2,274	24,93	3,2	17
b_7	2,02	3,5	3,93	8,15	2,07	4,35	17
b_8	17,84	12,81	16,08	1,44	6,57	0	9,5
b_9	5,14	0,78	6,138	15,35	0,56	4,5	17
b_{10}	7,69	7,51	5,66	2,92	1,45	3,61	17
b_{11}	13,84	5,92	9,79	9,58	8,22	0	17
b_{12}	3,15	0	12,72	4,08	6,33	5,5	17
b_{13}	3,62	5,16	7,59	0,89	0,95	2,95	4,5
b_{14}	5,2	3,93	1,55	1,782	6,6	2	4,5
b_{15}	0	0,18	0,14	0,13	0	0	0,62

Fonte: preparado pelo autor com base em dados fornecidos pela empresa A.

Tabela 13 – Coleta por veículo b no período t - Teste WR5

Tipos de veículos (b)	Períodos (t)						Capacidades dos veículos, por viagem, por período ([t])
	1	2	3	4	5	6	
b_1	2,2	10,764	6,52	17	0	12,52	17
b_2	0	1,742	5,197	13,6	10,64	13,901	16,6
b_3	1,28	0	17	3,179	0	15,8	17
b_4	3,04	0	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
b_5	4,87	14,415	7,55	17	3,116	13,937	17
b_6	0	6,661	5,75	0	9,58	7,21	17
b_7	2,06	4,8	0	13,62	17	16,39	17
b_8	0	9,5	6,225	0	0	9,5	9,5
b_9	0	12,375	8,776	8,727	3,06	3,5	17
b_{10}	0	13,184	0	14,89	10,53	1,815	17
b_{11}	17	7,579	0	7,228	5,865	7,066	17
b_{12}	0	0	0	6	16,64	13,556	17
b_{13}	0	3,246	2,51	4,5	1,568	4,5	4,5
b_{14}	0	0	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
b_{15}	0,06	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62

Fonte: preparado pelo autor.

Tabela 14 – Coleta por veículo b no período t - Teste L1ER5

Tipos de veículos (b)	Períodos (t)						Capacidades dos veículos, por viagem, por período ([t])
	1	2	3	4	5	6	
b_1	1,68	16,78	6,354	17	0,832	7,38	17
b_2	4,51	15,36	4,062	0	1,77	1,369	16,6
b_3	10,578	0	8,29	5,458	4,01	0	17
b_4	8,9	8,9	8,9	5,39	8,9	0	8,9
b_5	2,98	17	3,27	9,69	15,006	5,05	17
b_6	16,094	16,213	10,669	0	0	1,36	17
b_7	17	1,93	12,27	6,748	5,328	0	17
b_8	9,18	3,389	9,5	4,921	9,5	6,142	9,5
b_9	5,082	9,548	12,353	8,28	9,456	5,056	17
b_{10}	3,03	0	6,821	7,657	1,72	1,387	17
b_{11}	5,647	5,763	17	2,82	16,12	0	17
b_{12}	8,2	4,57	17	0	7,209	3,2	17
b_{13}	4,5	1,77	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
b_{14}	4,05	4,5	4,5	0	4,5	1,88	4,5
b_{15}	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,06	0,62

Fonte: preparado pelo autor.

Tabela 15 – Coleta por veículo b no período t - Teste WER5

Tipos de veículos (b)	Períodos (t)						Capacidades dos veículos, por viagem, por período ([t])
	1	2	3	4	5	6	
b_1	5,08	7,313	9,805	3,204	0	6,566	17
b_2	8,664	10,06	10,92	0	10,678	7,55	16,6
b_3	11,516	14,028	17	0	1,452	0,912	17
b_4	8,9	7,23	8,9	2,976	8,69	0,532	8,9
b_5	7,693	11,548	2,384	17	13,862	5,86	17
b_6	9,167	7,73	9,248	3,832	14,273	0	17
b_7	17	17	17	6,45	0	1,369	17
b_8	8,05	9,5	9,5	0	0,85	2	9,5
b_9	0	3,57	8,548	7,83	1,667	1,72	17
b_{10}	10,25	3,754	6,133	9,518	9,41	3,66	17
b_{11}	0	3,815	11,43	14,624	14,79	5,845	17
b_{12}	6,111	6,53	7,82	6,14	4,799	1,31	17
b_{13}	4,5	2,418	4,5	1,45	4,5	0	4,5
b_{14}	4,5	1,227	2,301	0,06	4,5	0	4,5
b_{15}	0,62	0,62	0,62	0	0	0	0,62

Fonte: preparado pelo autor.

4.3.3 Demanda

Em se tratando da demanda, a soma total de fardos entregues pela empresa foi de 884,36 t (A). A quantidade de fardos vendidos por período foi igual ao valor de A nos testes cujo estoque inicial

foi considerado. As Tabelas 16 e 17 comparam os estoques da empresa A aos apresentados no teste WER5 e as Figuras 40 e 41 ilustram as demandas por período.

Tabela 16 – Estoque por período - Teste WER5

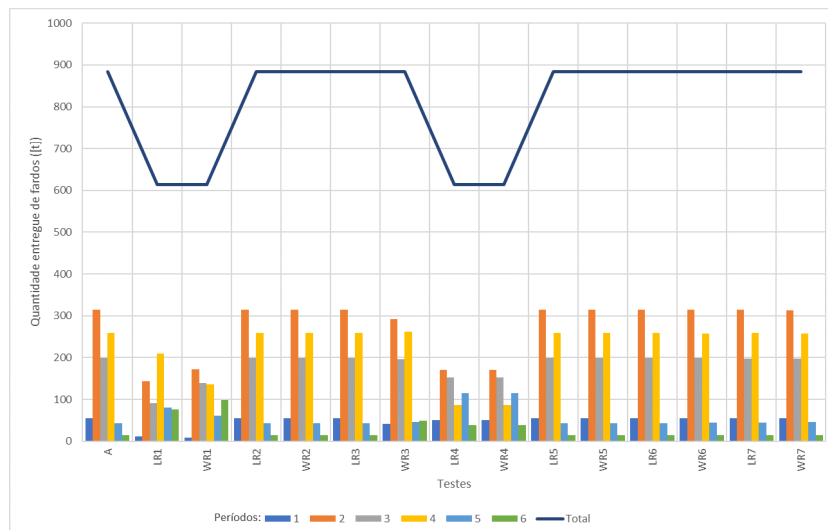
Item	Tipo de estoque	Quantidade diária de material em estoque (lt)					
		1	2	3	4	5	6
i_1	en_{it}	0	0	0	0	0	0
	ef_{it}	36,44	36,44	15,38	0	0	0
	Total	36,44	36,44	15,38	0	0	0
i_2	en_{it}	0	0,69	0	0	0	0
	ef_{it}	298,255	154,463	140,466	0	53,931	78,675
	Total	298,255	155,153	140,466	0	53,931	78,675
i_3	en_{it}	17,054	0	12,48	0	0	16,48
	ef_{it}	24,93	75,992	98,407	166,299	202,364	188,324
	Total	41,984	75,992	110,887	166,299	202,364	204,804
i_4	en_{it}	0	0	0	10,088	0	0
	ef_{it}	8,23	7,49	9,46	9,46	22,668	22,668
	Total	8,23	7,49	9,46	19,548	22,668	22,668
i_5	en_{it}	0	0	8,941	0	0	0
	ef_{it}	16,64	0	0	4,201	5,481	5,481
	Total	16,64	0	8,941	4,201	5,481	5,481
i_6	en_{it}	19,63	0	0	0	0	6,04
	ef_{it}	0	15,57	28,77	58,432	55,522	55,522
	Total	19,63	15,57	28,77	58,432	55,522	61,562
i_7	en_{it}	0	9,39	9,39	18,54	0	0
	ef_{it}	0	0	0	0	22,52	22,52
	Total	0	9,39	9,39	18,54	22,52	22,52
i_8	en_{it}	0	15,655	0	0	0	1,19
	ef_{it}	15,777	6,307	0	2,018	19,658	19,658
	Total	15,777	21,962	0	2,018	19,658	20,848
i_9	en_{it}	2,1	0	0,872	0	0	0
	ef_{it}	0	2,1	2,1	3,132	3,132	3,132
	Total	2,1	2,1	2,972	3,132	3,132	3,132
i_{10}	en_{it}	0	0	0	0	0	0
	ef_{it}	0	0	0	0	0	0
	Total	0	0	0	0	0	0
i_{11}	en_{it}	0	0,44	0,44	0	0	0
	ef_{it}	24,82	13,26	13,26	0	0	0
	Total	24,82	13,7	13,7	0	0	0
i_{12}	en_{it}	0	0	0	0	0	6,96
	ef_{it}	4,64	10,57	14,556	19,054	20,664	20,664
	Total	4,64	10,57	14,556	19,054	20,664	27,624
i_{13}	en_{it}	0	0	0	0	0	0
	ef_{it}	0	0	0	0	0	0
	Total	0	0	0	0	0	0
i_{14}	en_{it}	0	0,002	0,002	0	0	0
	ef_{it}	0,005	0,005	0,005	0,007	0,007	0,007
	Total	0,005	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
i_{15}	en_{it}	0	0	0	0	0	0
	ef_{it}	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0
	Total	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0
i_{16}	en_{it}	0	0	1,361	0	0	0
	ef_{it}	0	0	0	1,361	1,361	1,361
	Total	0	0	1,361	1,361	1,361	1,361
i_{17}	en_{it}	0	0	0	0	0	0
	ef_{it}	6,39	0	0	0	0	0
	Total	6,39	0	0	0	0	0
i_{18}	en_{it}	0	0	0	0	0	0
	ef_{it}	0	0	1,323	1,323	1,323	1,323
	Total	0	0	1,323	1,323	1,323	1,323

Fonte: preparado pelo autor.

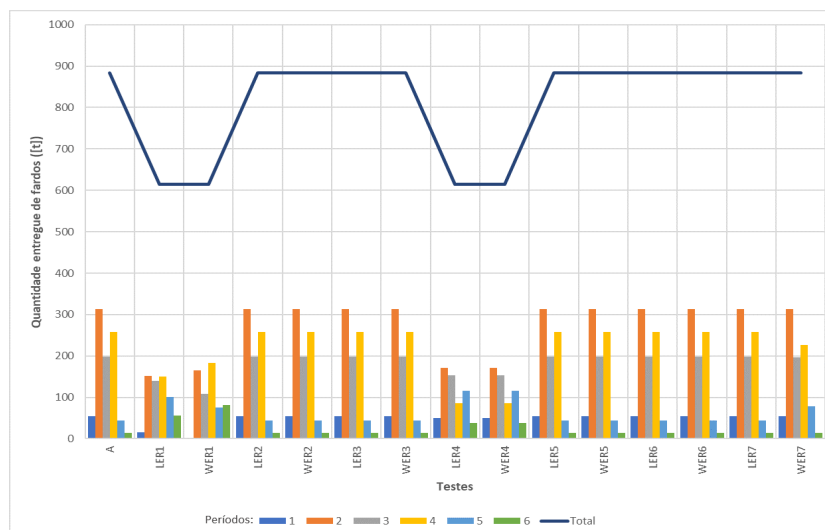
Tabela 17 – Estoque por período - Dados reais

Item	Quantidade diária de material em estoque ([t])					
	1	2	3	4	5	6
i_1	36,44	36,44	15,38	0	0	0
i_2	298,255	155,153	140,466	0	53,931	78,675
i_3	41,984	75,992	110,887	166,299	202,364	204,804
i_4	8,23	7,49	9,46	19,548	22,668	22,668
i_5	16,64	0	8,941	4,201	5,481	5,481
i_6	19,63	15,57	28,77	58,432	55,522	61,562
i_7	0	9,39	9,39	18,54	22,52	22,52
i_8	15,777	21,962	0	2,018	19,658	20,848
i_9	2,1	2,1	2,972	3,132	3,132	3,132
i_{10}	0	0	0	0	0	0
i_{11}	24,82	13,7	13,7	0	0	0
i_{12}	4,64	10,57	14,556	19,054	20,664	27,624
i_{13}	0	0	0	0	0	0
i_{14}	0,005	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
i_{15}	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0
i_{16}	0	0	1,361	1,361	1,361	1,361
i_{17}	6,39	0	0	0	0	0
i_{18}	0	0	1,323	1,323	1,323	1,323

Fonte: preparado pelo autor.

Figura 40 – Atendimento à Demanda - Testes com $kpc_{dt} > 0$ 

Fonte: preparado pelo autor

Figura 41 – Atendimento à Demanda - Testes com $kpc_{dt} = 0$ 

Fonte: preparado pelo autor

4.4 EXPERIMENTOS CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DE OUTROS RESÍDUOS

Muitos centros intermediários similares às empresas visitadas possuem como principal produto comercializado o papel, havendo menor quantidade de outros materiais. Assim, quando o fornecedor trabalha com papel e ferro, por exemplo, e solicita que a empresa faça a coleta de ambos os materiais, isto é realizado, em alguns momentos, de forma simultânea. Apesar disso, geralmente ou a capacidade do veículo fica ainda bastante ociosa, devido a pequena quantidade de material coletado, ou pelo menos um veículo da frota não é empregado para coleta no período. Portanto, a coleta de outros materiais, neste caso, possui pouca influência no processo logístico de resíduos de papel das empresas.

De qualquer forma, outro teste foi realizado descontando-se da capacidade do veículo a quantidade coletada de material diferente do resíduo de papel. Ou seja, o teste KER5 considera os dados do teste ER5, que impossibilita o armazenamento de material nos pontos de coleta, considera um estoque inicial, cuja entrega deve ser realizada respeitando - se o período estabelecido, além da substituição do valor da capacidade de cada veículo kt_b pelo parâmetro β_{bvt} que corresponde ao valor de kt_b menos a quantidade coletada de outros materiais pelo veículo $b \in B$, durante a viagem $v \in V$, no período $t \in T$.

Além disso, os veículos que não foram utilizados no período para coleta não foram considerados nestes testes e quando a capacidade do veículo era menor que a quantidade coletada, considerou-se mais de uma viagem possível para este veículo, conforme mostra as Tabelas 18 e 19. Os valores de β_{bvt} para a segunda e terceira viagens ($v = 2$ e $v = 3$), quando necessárias, foram iguais aos valores de kt_b .

As tabelas 20 e 21 apresentam os resultados do teste KER5 realizado com os métodos LGP e WGP, respectivamente.

Tabela 18 – Número de viagens por veículo (θ_{bt})

Tipos de veículos (b)	Períodos (t)					
	1	2	3	4	5	6
b_1	1	1	1	0	1	1
b_2	1	1	1	1	1	0
b_3	1	1	1	1	1	0
b_4	2	2	3	2	1	1
b_5	1	0	1	0	1	0
b_6	1	1	2	1	2	1
b_7	1	1	1	1	1	1
b_8	2	2	3	1	1	0
b_9	1	1	1	1	1	1
b_{10}	1	1	1	1	1	1
b_{11}	1	1	1	1	1	0
b_{12}	1	0	1	1	1	1
b_{13}	1	2	2	1	1	1
b_{14}	2	1	1	1	2	1
b_{15}	0	1	1	1	0	0

Fonte: preparado pelo autor com base em dados fornecidos pela empresa A.

Tabela 19 – Valores de β_{b1t} ([t])

Tipos de veículos (b)	Períodos (t)					
	1	2	3	4	5	6
b_1	12,059	17	17	0	15,9	15,81
b_2	16,5	15,745	16,6	16,6	9,62	0
b_3	17	14,41	17	9,1244	17	0
b_4	8,041	8,547	8,408	8,128	8,317	8,453
b_5	14,177	0	11,92	0	17	0
b_6	15,175	17	13,0635	16,797	17	16,68
b_7	16,24	16,63	17	16,76	16,94	17
b_8	9,5	9,5	2,79	9,5	6,57	0
b_9	17	4,62	16,353	17	17	16,8
b_{10}	17	16,06	13,86	14,79	17	17
b_{11}	15,986	16,28	12,65	13,67	13,24	0
b_{12}	12,26	0	17	17	17	16,56
b_{13}	4,03	3,78	3,68	3,96	4,5	3,94
b_{14}	3,89	4,5	2,09	4,169	3,77	4,5
b_{15}	0	0,62	0,62	0,62	0	0

Fonte: preparado pelo autor com base em dados fornecidos pela empresa A.

Tabela 20 – Coleta por veículo b no período t - Teste L1KER5

Tipos de veículos (b)	Viagens (v)	Períodos (t)					
		1	2	3	4	5	6
b_1	1	3,347	12,51	10,851	0	10,856	4,5
b_2	1	4,684	15,745	0	8,218	0,56	0
b_3	1	17	0,868	15,631	3,79	17	0
b_4	1	8,041	5,94	8,408	7,93	0	1,94
	2	2,282	8,9	8,9	8,9	0	0
	3	0	0	2,77	0	0	0
b_5	1	6,73	0	11,92	0	2,913	0
b_6	1	7,132	8,454	5,317	5,543	8,289	3,236
	2	0	0	11,06	0	2,27	0
b_7	1	5,357	15,043	10,707	2,841	6,132	6,934
b_8	1	9,5	1,32	2,79	9,5	2,277	0
	2	3,96	9,5	6,633	0	0	0
	3	0	0	6,62	0	0	0
b_9	1	6,174	4,62	0	7,79	0	6,53
b_{10}	1	5,93	10,043	0	9,902	15,454	3,6
b_{11}	1	4,934	0	12,612	1,53	0	0
b_{12}	1	7,04	0	1	0	15,45	6,145
b_{13}	1	3,37	3,78	3,68	3,96	4,5	0
	2	0	4,5	4,5	0	0	0
b_{14}	1	3,89	4,5	2,09	2,56	3,77	4,499
	2	2,68	0	0	0	0	0
b_{15}	1	0	0,62	0,62	0,62	0	0

Fonte: preparado pelo autor

Tabela 21 – Coleta por veículo b no período t - Teste WKER5

Tipos de veículos (b)	Viagens (v)	Períodos (t)					
		1	2	3	4	5	6
b_1	1	4,05	4,26	5,79	0	2,08	3,6
b_2	1	6,28	11,387	0	0,862	0	0
b_3	1	6,159	14,41	6,87	3,297	6,51	0
b_4	1	4,26	8,547	4,69	8,012	2,1	1,862
	2	8,9	7,78	1,18	8,33	0	0
	3	0	0	6,33	0	0	0
b_5	1	5,87	0	10,21	0	0	0
b_6	1	12,074	16,72	0,847	7,976	6,517	6,776
	2	0	0	15,475	0	11,153	0
b_7	1	7,686	16,63	17	5,981	16,94	7,355
b_8	1	9,5	8,741	2,79	2,09	0,06	0
	2	5,447	3,66	8,07	0	0	0
	3	0	0	4,941	0	0	0
b_9	1	8,763	0	0	9,13	10,122	5,11
b_{10}	1	9,42	0	13,86	1,95	4,244	6,25
b_{11}	1	0	0,808	12,286	11,5	13,24	0
b_{12}	1	1,97	0	9,38	9,306	3,859	3,32
b_{13}	1	3,282	3,78	3,68	2,44	4,5	1,802
	2	0	4,5	0	0	0	0
b_{14}	1	3,89	4,5	2,09	1,59	3,646	1,309
	2	4,5	0	0	0	0	4,5
b_{15}	1	0	0,62	0,62	0,62	0	0

Fonte: preparado pelo autor

Observa-se nos resultados apresentados na Tabela 20 uma redução de aproximadamente 11% no número de viagens em relação aos dados reais (Tabelas 18 e 12). Já no teste realizado com o método WGP (Tabela 21), a redução no número de viagens foi de aproximadamente 9% em relação aos dados reais.

As Tabelas 22 e 23 apresentam os resultados da coleta por veículo do teste KER5-2 para os métodos LGP (L1 e L2) e WGP, respectivamente, realizado considerando-se os dados do teste KER5, mas com restrição de apenas uma viagem permitida por veículo. Ou seja, os valores de $\theta_{bt} > 1$ na Tabela 18, foram restritos a 1 em KER5-2. Observa-se que mesmo com a restrição da capacidade de coleta e apenas 1 viagem possível por veículo as soluções ótimas encontradas ($Z=0$) apresentaram uma redução de aproximadamente 23% no número de viagens (72 viagens ao longo do horizonte de planejamento).

A otimização do número de viagens está relacionada ao gerenciamento da coleta, proporcionando um melhor controle do tempo gasto para coletar resíduos, da distância percorrida por cada veículo e da minimização da capacidade ociosa dos veículos empregados (e, conseqüentemente, do custo).

Verificou-se, também, que a diminuição do número de viagens, em testes com metas de custo ou distância relaxadas não necessariamente minimizam a distância percorrida (e o custo de transporte associado, conseqüentemente). Por exemplo, o teste WKER5 apresentou uma distância total percorrida menor do que o teste WKER5-2, apesar do número de viagens ter sido maior. Em compensação, nenhum dos testes apresentou desvio em relação às metas.

Tabela 22 – Coleta por veículo b no período t - Teste L1KER5-2

Tipos de veículos (b)	Viagens (v)	Períodos (t)					
		1	2	3	4	5	6
b_1	1	6,599	13,788	17	0	0	0,855
b_2	1	10,01	13,891	2,571	0	0	0
b_3	1	11,317	14,41	4,4865	1,368	7,28	0
b_4	1	8,041	8,547	7,318	3,244	5,446	6,95
b_5	1	3,782	0	11,92	0	12,51	0
b_6	1	2,197	2,579	13,0635	4,94	15,378	9,611
b_7	1	16,24	6,783	17	16,76	9,457	0
b_8	1	6,733	9,5	1,77	4,41	2,34	0
b_9	1	14,472	4,62	7,77	0	3,93	1,892
b_{10}	1	2,12	7,045	13,56	14,79	0	2,4
b_{11}	1	0,36	16,28	12,65	8,85	13,24	0
b_{12}	1	12,26	0	10,61	13,67	11,62	7,236
b_{13}	1	4,03	3,78	3,68	3,96	4,5	3,94
b_{14}	1	3,89	4,5	2,09	0,472	3,77	4,5
b_{15}	1	0	0,62	0,62	0,62	0	0

Fonte: preparado pelo autor

Tabela 23 – Coleta por veículo b no período t - Teste WKER5-2

Tipos de veículos (b)	Viagens (v)	Períodos (t)					
		1	2	3	4	5	6
b_1	1	5,887	17	17	0	5,203	8,36
b_2	1	6,42	15,745	11,51	7,51	0	0
b_3	1	4,084	8,11	5,575	4,03	2,498	0
b_4	1	1,53	8,547	8,408	8,128	8,317	0
b_5	1	13,67	0	1,093	0	7,22	0
b_6	1	10,349	17	12,376	5,758	11,558	13,892
b_7	1	12,244	10,488	17	16,76	15,15	2,822
b_8	1	9,5	6,565	2,79	9,05	4,53	0
b_9	1	4,51	4,62	5,341	2,69	5,279	0
b_{10}	1	13,441	8,418	8,976	7,65	1,307	7,81
b_{11}	1	4,45	1,71	12,65	1,858	3,139	0
b_{12}	1	8,046	0	17	0,901	17	0
b_{13}	1	4,03	3,78	3,68	3,96	4,5	0
b_{14}	1	3,89	4,36	2,09	4,169	3,77	4,5
b_{15}	1	0	0	0,62	0,62	0	0

Fonte: preparado pelo autor

4.5 EXPERIMENTOS COM PONTOS DE COLETA DIÁRIA

Como explicado no Capítulo 3, em alguns pontos de fornecimento de resíduos a coleta é realizada de forma esporádica, quando o cliente faz a solicitação à empresa para o recolhimento do material. Em outros pontos, a coleta é realizada respeitando uma certa periodicidade, havendo, em muitos casos, um contrato entre a empresa e o fornecedor.

Identificou-se 6 pontos de fornecimento de material cuja coleta de apenas um tipo de material é realizada diariamente pela empresa. Neste caso, a rota geralmente é fixada e realizada por um mesmo

tipo de veículo, destinado apenas para esta rota. Assim, foram realizados testes com os métodos WGP e LGP, considerando 6 períodos ([dias]) e as sequências de prioridades conforme Quadro 17. O Quadro 18 apresenta as configurações utilizadas nos testes. As alterações em relação ao Quadro 15 foram: $|I| = 1$, $|D| = 6$, $|C| = 4$, $|F| = 6$, $kd = 0,53$, $l_{bvt} = 34,78 \text{ km}$, $Od = R\$71.386,38$, apenas um veículo com capacidade de 17 t e $h_i = R\$590,00$

Quadro 18 – Testes considerando pontos de coleta diária

Testes	Configurações
T1	$kpc_{dt} > 0, \forall i, d, t$ e $qr_{ift} = 0, \forall i, f, t$
T2	$kpc_{dt} = 0, \forall i, d, t$ e $qr_{ift} = 0, \forall i, f, t$
T3	$qr_{ift} = 0, \forall i, f, t$ e rota da companhia fixada

Fonte: preparado pelo autor.

As Tabelas 24, 25, 26 e 27 apresentam os valores dos desvios cujos resultados foram diferentes de zero em pelo menos um teste. De uma forma geral, observa-se no teste T1, Figura 42, que ao considerar a possibilidade de armazenamento de material nos pontos de coleta, para a minimização da soma dos desvios, só houve coleta, em todos os pontos de coleta, em 3 períodos do horizonte de planejamento (períodos 2, 4 e 6). Como esta situação é pouco frequente em se tratando destes pontos de coleta, já que as instalações possuem pouco espaço disponível para armazenamento de material, de acordo com informações do gestor da empresa A, o teste T2 foi realizado considerando que os pontos de coleta não possuem capacidade de armazenamento de material. No teste T3, a rota realizada pela empresa foi fixada para comparação dos resultados.

Segundo informações obtidas, algumas restrições são impostas pela prefeitura da cidade em relação aos horários de deslocamento dos veículos. Desta forma, fixou-se apenas a sequência dos três primeiros pontos de coleta do teste T3 (ou seja, da rota realizada pela empresa) e os resultados correspondem aos valores de T3*.

Observa-se que os resultados obtidos com os métodos L1, L2 e L4, cuja minimização do desvio associado à distância percorrida é prioridade em relação aos desvios associados à coleta, foram iguais, assim como os resultados obtidos com os métodos WGP, L3, L5 e L6. Em L1, L2 e L4, T1, T2 e T3* apresentaram valores diferentes de zero para Z_6 o que ocasionou a redução de Z_2 e o aumento de Z_3 e de Z_4 . Já em WGP, L3, L5 e L6, a coleta foi completa (Z_6) e ao comparar os teste T1, T2 e T3* à T3, verifica-se uma redução de Z_2 . Como em T3 a rota foi fixada, os valores obtidos foram os mesmos para todos os métodos.

Tabela 24 – Resultados dos testes - Valores de $Z_2([km])$

Testes	WGP	L1	L2	L3	L4	L5	L6
T1	0,009	0	0	0,009	0	0,009	0,009
T2	0,018	0	0	0,018	0	0,018	0,018
T3	82,968	82,968	82,968	82,968	82,968	82,968	82,968
T3*	50,976	7,914	7,914	50,976	7,914	50,976	50,976

Fonte: preparado pelo autor.

Tabela 25 – Resultados dos testes - Valores de $Z_3([t])$

Testes	WGP	L1	L2	L3	L4	L5	L6
T1	17,28	17,86	17,86	17,28	17,86	17,28	17,28
T2	17,28	20,36	20,36	17,28	20,36	17,28	17,28
T3	17,28	17,28	17,28	17,28	17,28	17,28	17,28
T3*	17,28	36,12	36,12	17,28	36,12	17,28	17,28

Fonte: preparado pelo autor.

Tabela 26 – Resultados dos testes - Valores de $Z_4([t])$

Testes	WGP	L1	L2	L3	L4	L5	L6
T1	2,918	3,45	3,45	2,918	3,45	2,918	2,918
T2	2,918	7,76	7,76	2,918	7,76	2,918	2,918
T3	2,918	2,918	2,918	2,918	2,918	2,918	2,918
T3*	2,918	29,85	29,85	2,918	29,85	2,918	2,918

Fonte: preparado pelo autor.

Tabela 27 – Resultados dos testes - Valores de $Z_6([t])$

Testes	WGP	L1	L2	L3	L4	L5	L6
T1	0	0,53	0,53	0	0,53	0	0
T2	0	4,85	4,85	0	4,85	0	0
T3	0	0	0	0	0	0	0
T3*	0	26,96	26,96	0	26,96	0	0

Fonte: preparado pelo autor.

Como o objetivo desta seção é comparar as possíveis rotas encontradas nos testes com a rota da empresa, as Figuras 42 e 43 apresentam, respectivamente, as quantidades coletadas e as rotas por período dos testes T1 e T2 realizados com os métodos WGP, L3, L5 e L6. A Figura 44 compara as rotas ótimas encontradas nos testes T2 e T3* e a rota da empresa (teste T3). Finalmente, as Tabelas 28 e 29 mostram os valores obtidos para as quantidades coletadas e distâncias percorridas por período, respectivamente.

Verifica-se que com a possibilidade de acúmulo de material para posterior coleta, no teste T1 houve uma melhor ocupação da capacidade do veículo, diminuindo-se, assim, a capacidade ociosa durante a coleta. Nos testes WGP, L3, L5 e L6, o desvio em relação à quantidade coletada de material ao longo do horizonte de planejamento foi igual a zero. Ao comparar os testes T2 e T3, observa-se a diferença entre as rotas e, conseqüentemente, entre os desvios em relação à meta de distância percorrida por período.

Em T3*, embora a mudança tenha sido pequena, uma alteração na sequência dos pontos de coleta $d = 3$ e $d = 4$ pode ser observada, o que, ainda assim, ocasionou uma diminuição no valor da distância percorrida, se comparado a T3.

Como o valor considerado da meta de distância percorrida foi $l_{bvt} = 34,78 \forall b, v, t$, observa-se na Tabela 29 que os valores de Z_2 foram diferentes de zero no teste T1 apenas nos períodos 2, 4 e 6. Nos períodos restantes, verifica-se valores das distâncias percorridas diferentes entre os métodos utilizados, o que mostra várias possibilidades de rotas ótimas com variações das distâncias ao longo do horizonte de planejamento.

Tabela 28 – Quantidade coletada por período ([t]) - Métodos WGP e LGP (L3, L5 e L6)

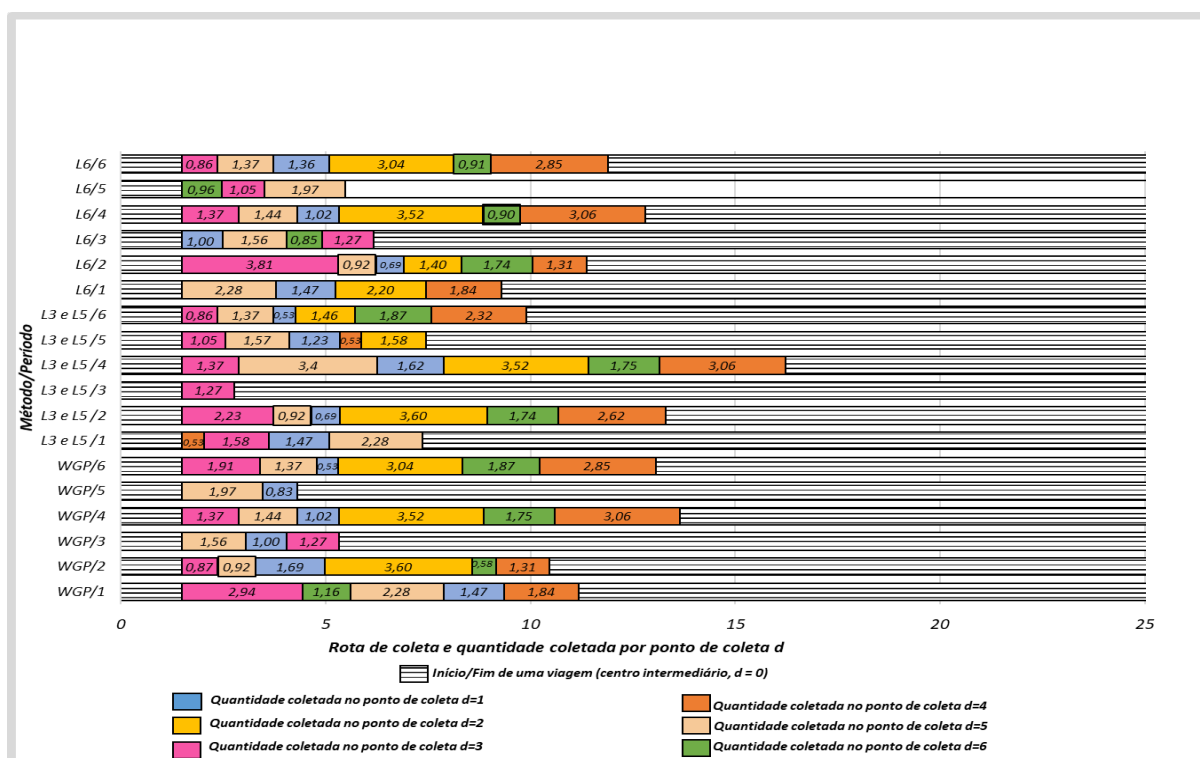
Método	Testes	Períodos ([dias])					
		1	2	3	4	5	6
WGP	T1	9,69	7,97	3,83	12,16	2,80	11,57
	T2	11,89	5,77	7,89	8,5	7,42	6,55
	T3	11,89	5,77	7,89	8,5	7,42	6,55
	T3*	11,89	5,77	7,89	8,5	7,42	6,55
L3	T1	5,86	11,80	1,27	14,72	5,96	8,41
	T2	11,89	5,77	7,89	8,5	7,42	6,55
	T3	11,89	5,77	7,89	8,5	7,42	6,55
	T3*	11,89	5,77	7,89	8,5	7,42	6,55
L5	T1	5,86	11,80	1,27	14,72	5,96	8,41
	T2	11,89	5,77	7,89	8,5	7,42	6,55
	T3	11,89	5,77	7,89	8,5	7,42	6,55
	T3*	11,89	5,77	7,89	8,5	7,42	6,55
L6	T1	7,79	9,87	4,68	11,31	3,98	10,39
	T2	11,89	5,77	7,89	8,5	7,42	6,55
	T3	11,89	5,77	7,89	8,5	7,42	6,55
	T3*	11,89	5,77	7,89	8,5	7,42	6,55

Tabela 29 – Distância percorrida por período ([km]) - Métodos WGP e LGP (L3, L5 e L6)

Teste/Método	Períodos ([dias])					
	1	2	3	4	5	6
T1/WGP	31,762	34,783	15,894	34,783	13,754	34,783
T1/L3	21,157	34,783	10,063	34,783	34,502	34,783
T1/L5	21,157	34,783	10,063	34,783	34,502	34,783
T1/L6	32,634	34,783	31,885	34,783	26,981	34,783
T2/WGP, L3, L5 e L6	34,783	34,783	34,783	34,783	34,783	34,783
T3/WGP, L3, L5 e L6	48,608	48,608	48,608	48,608	48,608	48,608
T3*/WGP, L3, L5 e L6	43,276	43,276	43,276	43,276	43,276	43,276

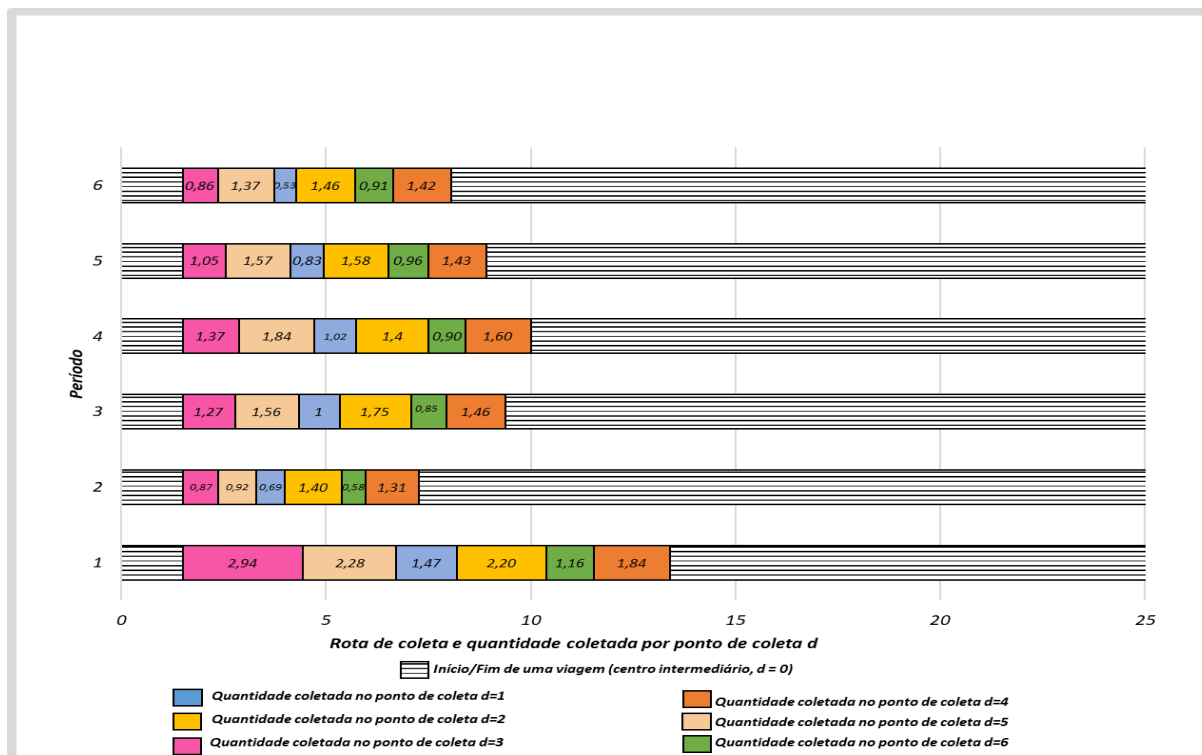
Fonte: preparado pelo autor.

Figura 42 – Rota e quantidade coletada - Teste T1 - Métodos WGP e LGP (L3, L5 e L6)



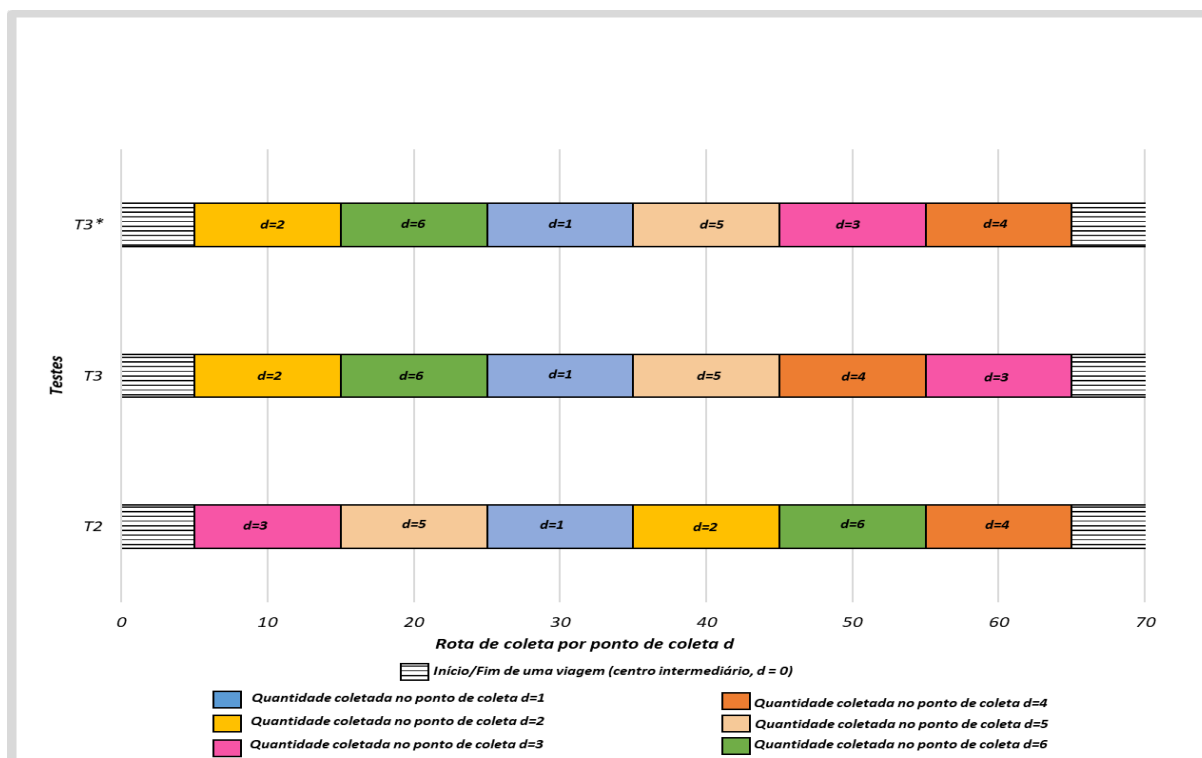
Fonte: preparado pelo autor

Figura 43 – Rota e quantidade coletada - Teste T2 - Métodos WGP e LGP (L3, L5 e L6)



Fonte: preparado pelo autor

Figura 44 – Rotas - Métodos WGP e LGP (L3, L5 e L6)



Fonte: preparado pelo autor

4.6 TESTES COM 23 PERÍODOS

Para analisar o desempenho do modelo, foram realizados testes com um horizonte de planejamento de 23 dias, 18 tipos de resíduos, 16 veículos, 1 viagem, 139 pontos de coleta, 75 fornecedores (que entregam os resíduos no centro intermediário) e 23 clientes (compradores de fardos). Os testes foram realizados considerando um estoque inicial de fardos ($ef_{i_1} = 137,96, ef_{i_2} = 907,027, ef_{i_4} = 32,456, ef_{i_5} = 37,363, ef_{i_7} = 55,672, ef_{i_8} = 18,657, ef_{i_{11}} = 95,21, ef_{i_{15}} = 0,84, ef_{i_{17}} = 40,31$), $Od = R\$2.584.553,99$ e $\lambda_{ict} = dp_{ict} + df_{ict-1}^-$. O teste “CW” foi realizado utilizando a Programação por Metas Ponderada, os testes nomeados “CL” foram realizados utilizando a Programação por Metas Lexicográfica, conforme Quadro 17. Os testes cujo nome inicia-se com “E” consideraram o armazenamento de material nos pontos de coleta ($kpc_{dt} = 0$), conforme mostra o Quadro 30.

O número total de variáveis, o número de variáveis binárias e o número de restrições pertencem ao intervalo [4.000.000, 5.000.000] para os testes com $kpc_{dt} > 0$ e ao intervalo [300.000, 400.000] para $kpc_{dt} = 0$. Em se tratando de CL1, por exemplo, foram 4.360.700 variáveis, sendo 4.203.904 binárias e 4.366.662 restrições. Para ECL1, foram geradas 356.416 variáveis, sendo 328.048 binárias e 363.042 restrições. A Figura 45 ilustra os tempos de execução dos testes realizados com o método lexicográfico por ordem de otimização, de acordo com o Quadro 17. O tempo máximo considerado foi de 28.800 segundos para todos os testes.

Observa-se que apenas nos testes ECL1, ECL2, CL3 e CL4 a otimização foi completa, ou seja, foi encontrado um valor para a relaxação linear e o tempo de execução na parte 3 do processo de otimização foi computado. Em se tratando dos testes CW e ECW, apenas o teste ECW apresentou GAP, com tempo de execução de 2.734,98 segundos. Portanto, na Tabela 30 os resultados dos desvios estão disponíveis apenas para estes testes.

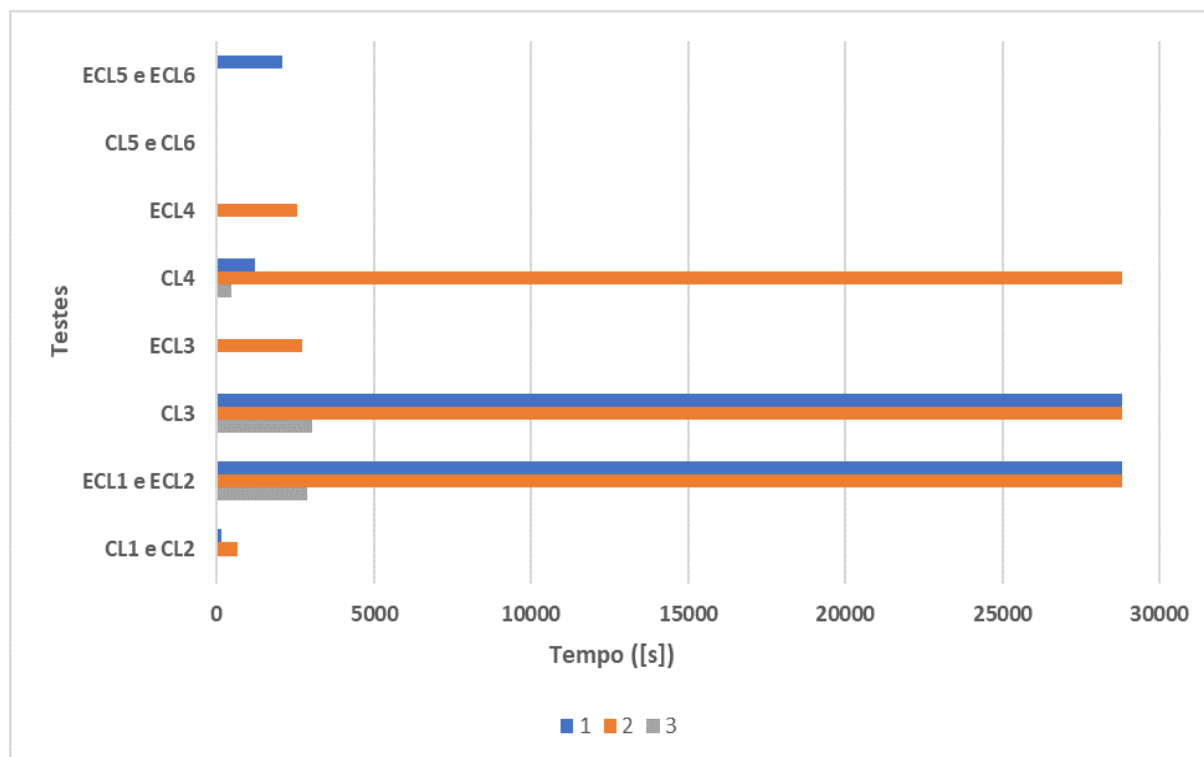
Verifica-se que os testes ECW, ECL1 e ECL2 apresentaram os mesmos resultados, assim como os testes CL3 e CL4. Estes resultados estão de acordo com os resultados obtidos com os exemplares menores.

Tabela 30 – Testes com 23 períodos

Testes	$Z_1([R\$])$	$Z_2([km])$	$Z_3([t])$	$Z_4([t])$	$Z_5([t])$	$Z_6([t])$	$Z_7([t])$	$Z_8([t])$	GAP
CW	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CL1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CL2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CL3	0	0	15.247,66	1.374,72	0,55	2.161,83	0	0	0,00%
CL4	0	0	15.247,66	1.374,72	0,55	2.161,83	0	0	0,00%
CL5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CL6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ECW	0	0	914,469	0	1,379	21,898	0	0	0,00%
ECL1	0	0	914,469	0	1,379	21,898	0	0	0,00%
ECL2	0	0	914,469	0	1,379	21,898	0	0	0,00%
ECL3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ECL4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ECL5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ECL6	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Fonte: preparado pelo autor.

Figura 45 – Tempo de execução - Testes realizados com o método lexicográfico



Fonte: preparado pelo autor

4.7 DISCUSSÃO SOBRE QUESTÕES DE SUSTENTABILIDADE

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo de otimização multiobjetivo para os processos logísticos de reciclagem de resíduos de papel contemplando fatores associados aos pilares da sustentabilidade.

Neste sentido, as Seções 4.3, 4.4 e 4.5 apresentaram resultados associados a questões econômicas, como diferentes formas de planejamento logístico com o objetivo de minimizar os desvios relacionados às metas de coleta (db^- , dd_{bvt}^+ , dv_{bvt}^- , dg_{dbvt}^-); possibilidade de variações no armazenamento de material e produção de fardos (da_t^-) para atendimento à demanda (dq_i^-) com possibilidade de adiantamento ou atraso por período em relação à meta de atendimento à demanda (df_{ict}^-); e minimização de custos (dc^+).

Em relação às questões ambientais, as diferentes possibilidades de reorganização logística, discutidas nas seções anteriores, possibilitam que os veículos sejam melhor empregados para a coleta e que, se houver capacidade operacional disponível, haja um aumento da quantidade coletada de material o que pode causar um impacto não só econômico, mas também ambiental. Na Tabela 15 da Seção 4.3.2, por exemplo, observa-se que 13 veículos não foram utilizados em diferentes períodos ao longo do horizonte de planejamento. Portanto, se disponível, no mínimo 138,96t (capacidade total dos 13 veículos) de resíduos poderão ser coletados para a produção e venda de fardos que poderão ser utilizados na produção de papel, o que em substituição às fibras virgens, diminui a quantidade necessária de água, economiza energia e reduz as emissões de gases causadores do efeito estufa (GHINEA et al., 2014).

Em se tratando especificamente da coleta de resíduos, a reorganização logística com o objetivo de

minimizar a distância percorrida afeta diretamente a quantidade de gases emitidos, como o dióxido de carbono. A Tabela 31 associa os resultados dos testes realizados com os pontos de coleta diária (Seção 4.5) à quantidade (em kg) de gases emitidos causadores do efeito estufa. Para o cálculo, foi considerado que a taxa de emissão é de 0,2 kg/km (ABDOLI; MIRHASSANI; HOOSHMAND, 2017).

Tabela 31 – Quantidade de gases emitidos ([km]) - Métodos WGP e LGP (L3, L5 e L6)

Teste/Método	Quantidade de gases emitidos ([kg])
T1/WGP	33,1518
T1/L3	34,0142
T1/L5	34,0142
T1/L6	39,1698
T2/WGP,L3,L5,L6	41,7396
T3/WGP,L3,L5,L6	58,3296
T3*/WGP,L3,L5,L6	51,9312

Fonte: preparado pelo autor.

Observa-se uma diminuição de aproximadamente 11% no teste T3* da quantidade de gases emitidos em relação aos resultados reais (teste T3) .

Em se tratando de questões sociais, a possibilidade de aumento da quantidade coletada de material associada ao aumento da demanda pode implicar na necessidade de aumento de carga horária operacional de trabalho, tanto por meio de horas extras quanto via contratação de mais funcionários.

Portanto, recomenda-se aos tomadores de decisão especial atenção ao planejamento logístico, além de sugestões de melhorias apresentadas neste capítulo que afetam aspectos não só econômicos, mas também ambientais e sociais.

5 MODELO COM INCERTEZA

No problema estudado, verificou-se variações diárias na quantidade de material disponível para a coleta que acontecem devido a variações na disponibilidade dos resíduos, impactando, por exemplo, na produção de fardos, no atendimento à demanda e nos níveis de estoque. Desta forma, para incorporar a incerteza, foi considerada uma adaptação do modelo de Programação por Metas Multiescolha Revisado proposto por Chang (2008). A adaptação utilizada incorpora incerteza no parâmetro referente à quantidade de material disponível para coleta, que faz parte tanto de restrições flexíveis, como meta, quanto de restrições rígidas, como limitante. Com base na formulação proposta em Silva, Marins e Dias (2015), para os níveis de aspirações foram consideradas variações de p_{1i} e p_{2i} em relação ao valor determinístico da meta. Uma explicação mais detalhada sobre o modelo proposto por Chang (2008) e a adaptação considerada neste trabalho está disponível no Apêndice C.

5.1 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Foram realizados testes com os Cenários apresentados no Quadro 16 considerando a Programação por Metas Ponderada e a Programação por Metas Multichoice Revisada. No modelo determinístico, foi considerado $\beta = 1$ e $\pi = \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} kh_{idt}$. Desta forma, a incerteza nos Cenários 1 a 7 foi incorporada por meio de variações de π nos intervalos $[0,9;1,1]$, $[0,8;1,2]$ e $[0,7;1,3]$. Ou seja, $p_1 = 0,9$ e $p_2 = 1,1$; $p_1 = 0,8$ e $p_2 = 1,2$; $p_1 = 0,7$ e $p_2 = 1,3$. Para cada intervalo, foram realizados testes com a meta $\pi \times p_1$ e a meta $\pi \times p_2$. Assim, para cada Cenário, foram realizados 7 testes: considerando o modelo determinístico; considerando os modelos com as três variações de π e as metas $\pi \times p_1$ e $\pi \times p_2$. As Tabelas 32 e 33 apresentam, respectivamente, as quantidades coletadas ao longo do horizonte de planejamento e os valores da variável auxiliar y . A comparação entre os *GAP* é ilustrada pela Figura 46.

Tabela 32 – Quantidade coletada ao longo do horizonte de planejamento ([t])

Testes	$\pi \times (p_1 = 0,9)$	$\pi \times (p_2 = 1,1)$	$\pi \times (p_1 = 0,8)$	$\pi \times (p_2 = 1,2)$	$\pi \times (p_1 = 0,7)$	$\pi \times (p_2 = 1,3)$	Determinístico
WR1	535,49	434,911	434,32	633,35	546,13	645,80	534,442
WR2	518,034	459,72	401,49	514,74	461,12	262,46	459,737
WR3	508,75	465,38	488,41	568,3	465,54	588,14	534,442
WR4	525,14	578,62	546,23	641,33	551,77	693,32	534,442
WR5	517,35	479,98	489,50	641,33	378,89	585,25	534,442
WR6	504,54	584,49	513,09	637,62	467,35	567,71	527,770
WR7	514,34	571,143	504,112	624,79	489,56	681,14	513,550
WER1	539,32	587,89	542,90	641,33	547,12	669,13	534,442
WER2	501,17	574,2	467,16	621,98	433,52	671,80	534,442
WER3	502,85	587,89	471,22	614,07	435,37	673,80	533,156
WER4	539,30	587,89	543,61	641,33	548,19	658,24	534,442
WER5	501,78	587,80	568,084	633,95	433,55	672,84	534,442
WER6	500,80	587,89	473,32	641,33	435,37	694,78	534,442
WER7	453,74	496,05	446,94	560,26	439,80	620,64	428,34

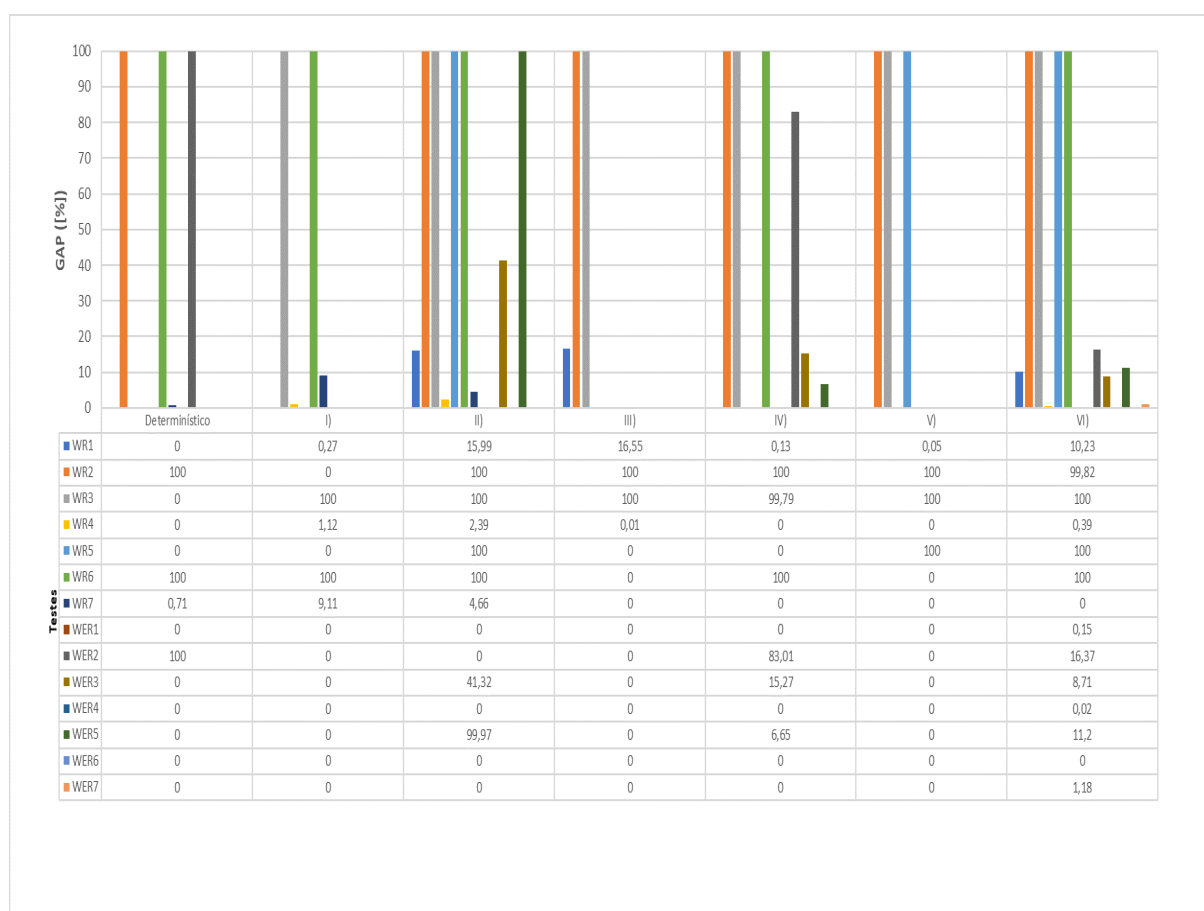
Fonte: preparado pelo autor.

Tabela 33 – Valores da variável auxiliar y ([t])

Testes	$\pi \times (p_1 = 0, 9)$	$\pi \times (p_2 = 1, 1)$	$\pi \times (p_1 = 0, 8)$	$\pi \times (p_2 = 1, 2)$	$\pi \times (p_1 = 0, 7)$	$\pi \times (p_2 = 1, 3)$
WR1	538,09	561,08	523,10	641,33	547,60	688,11
WR2	518,034	578,80	488,71	627,96	467,06	694,78
WR3	512,71	586,00	489,57	615,16	466,79	686,27
WR4	538,30	584,80	546,23	641,33	551,77	694,78
WR5	517,35	566,17	489,50	641,33	482,14	670,41
WR6	514,32	587,89	513,09	639,90	467,36	619,57
WR7	529,71	587,44	515,14	641,33	496,91	694,78
WER1	539,32	587,89	542,90	641,33	547,12	681,36
WER2	501,65	587,72	467,16	634,61	433,52	694,73
WER3	502,85	587,89	471,22	629,24	435,37	684,80
WER4	539,30	587,89	543,61	641,33	548,19	690,68
WER5	501,78	587,80	468,084	636,75	433,55	688,95
WER6	500,80	587,89	473,32	641,33	435,37	694,78
WER7	528,88	587,89	500,99	614,31	479,25	694,78

Fonte: preparado pelo autor.

Figura 46 – GAP - Modelos determinístico e sob incerteza



Fonte: preparado pelo autor

Observa-se na Figura 46 que a variação dos parâmetros pode aumentar a dificuldade do modelo. Como a dificuldade do modelo está associada à sua dimensão, verifica-se que em aproximadamente 71% dos testes que consideraram a possibilidade de armazenamento de material nos pontos de coleta a solução ótima não foi encontrada. Além disso, o aumento do valor da meta também está associada ao aumento da dificuldade do modelo. O número de testes do tipo “quanto mais melhor” que apresentaram $Gap = 0\%$ foi menor do que os testes do tipo “quanto menos melhor”.

Ao comparar os testes com $Gap = 0\%$, observa-se nos testes cujas metas foram multiplicadas por p_1 que apenas uma quantidade mínima necessária para minimizar os desvios associados à meta foi coletada. Por exemplo, nos resultados obtidos com WER6, a quantidade coletada foi menor nos testes cuja meta foi multiplicada por p_1 se comparado aos testes cuja meta foi multiplicada por p_2 . Portanto, se houver necessidade de armazenar material para venda em períodos cuja disponibilidade de resíduos para coleta é menor, a melhor opção é considerar a meta multiplicada por p_2 , cuja coleta será maior e, conseqüentemente, também o material armazenado ao final do horizonte de planejamento .

Ao comparar os cenários determinísticos e sob incerteza, verifica-se que os resultados obtidos com a utilização do modelo *Revised Multi-Choice Goal Programming* mostram que a abordagem utilizada permitiu a representação de vários cenários encontrados em situações vivenciadas por empresas do setor, além de melhorar a análise de sensibilidade da solução. No entanto, a variação dos parâmetros pode aumentar a dificuldade do modelo, fazendo com que algumas vezes o modelo determinístico seja a melhor opção para o tomador de decisões.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

6.1 VERIFICAÇÃO DAS QUESTÕES DE PESQUISA E DOS OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo de otimização multiobjetivo para os processos logísticos de reciclagem de resíduos de papel contemplando fatores sustentáveis.

Primeiramente, uma busca na literatura foi realizada para a identificação de trabalhos envolvendo modelos matemáticos para a otimização do sistema logístico de reciclagem de resíduos de papel. Este trabalho apresenta as seguintes contribuições relacionadas à pesquisa bibliográfica realizada: análise das etapas dos processos considerados nos artigos estudados e um resumo destas etapas, representadas por redes, para ajudar a construir modelos matemáticos e conduzir investigações futuras; análise dos objetivos encontrados nos modelos formulados, considerando fatores econômicos, ambientais e sociais; pesquisa sobre formulações e técnicas usadas para promover a otimização de redes de reciclagem de resíduos de papel, apontando soluções que contribuem para a eficiência e desenvolvimento sustentável de redes; investigação de parâmetros aleatórios e técnicas usadas para lidar com incerteza; elaboração de uma rede conceitual que relaciona os processos de reciclagem de resíduos de papel aos aspectos estudados e a considerações para pesquisas futuras.

Após esta pesquisa na literatura, verificou-se que estudos envolvendo o planejamento de sistemas de reciclagem de resíduos de papel e métodos quantitativos para a otimização dos processos ainda são escassos (PATI; VRAT, 2010; SAHAMIE; STINDT; NUSS, 2013). Poucos foram os trabalhos encontrados na literatura consultada incluindo abordagens quantitativas para processos específicos de centros intermediários, aplicadas a diferentes realidades, como a brasileira. Verificou-se, também, poucos trabalhos que combinaram Programação Linear Inteira Mista, modelos multiobjetivos e incerteza. Assim, o presente trabalho focou na otimização das etapas logísticas de um sistema de reciclagem de resíduos de papel considerando os processos vivenciados por centros intermediários.

Além da literatura consultada, visitas técnicas a empresas do setor aparista foram realizadas para identificar o processo de gerenciamento logístico de resíduos de papel, os parâmetros e as oportunidades de melhorias.

Com base nas informações obtidas por meio das pesquisas científica e de campo, um novo modelo matemático de otimização com objetivos conflitantes e relacionados à sustentabilidade foi desenvolvido. Basicamente, as etapas logísticas otimizadas pelo modelo envolvem o planejamento da coleta, da produção e do atendimento à demanda. Desta forma, o modelo maximiza a quantidade coletada de material relevante para a reciclagem, maximiza a produção e o atendimento à demanda, minimiza a distância percorrida pelos veículos e minimiza os custos. O modelo considera ainda variações de material que acontecem devido às variações na disponibilidade dos resíduos e a possibilidade de armazenamento de material nos pontos de coleta.

Para um melhor entendimento do modelo elaborado, foram realizados testes com exemplares ilustrativos utilizando dados da literatura e algumas informações reais e os resultados obtidos foram analisados para verificar a coerência com o cenário real estudado. Inicialmente, para o modelo de Programação por Metas Lexicográfico, os testes foram organizados considerando variações de

prioridades, importantes para verificar os *tradeoff* entre as metas. Os resultados destes testes mostraram que a variação das prioridades influenciam as soluções. Por exemplo, em alguns testes, ao priorizar as metas associadas à coleta por veículo ou por ponto de coleta (Z_7 ou Z_8) houve aumento de desvios associados às metas de distância máxima, venda de fardos e coleta ao longo do horizonte de planejamento (Z_2 , Z_3 , Z_4 e Z_6). Observou-se também variações de desvios relacionados aos custos (Z_1) associadas a alterações de produção, venda de fardos e coleta (Z_3 , Z_4 , Z_5 , Z_6 e Z_8). Destaca-se ainda diferentes combinações entre os resultados das metas associadas à venda de fardos (Z_3 e Z_4) e à coleta (Z_6 , Z_7 e Z_8), como em P4, P5, P6, P9 e P10.

Em seguida, os testes foram organizados considerando-se variações de prioridades conforme as grandezas associadas às metas ([R\$], [km] e [t]). Os resultados mostraram diferenças entre as soluções cuja prioridade alterada estava associada à grandeza tonelada (Z_s). Ou seja, observou-se diferenças entre as metas ao comparar os resultados de PS1 e PS2 aos resultados de PS3 e PS4 e aos resultados de PS5 e PS6.

Finalmente, foram realizados testes com o modelo de Programação por Metas Ponderada. Os resultados obtidos com o método WGP foram iguais aos resultados obtidos com a sequência de prioridades P4. Em se tratando de coleta, produção, estoque e demanda, foram analisados os modelos WGP, LGP - PS1 e LGP - PS5, que apresentaram diferentes resultados para desvios associados aos custos (Z_1). Ao comparar os modelos, verificou-se diferenças principalmente em relação às rotas, coleta e entrega de material. Entretanto, observou-se similaridades entre os métodos, indicando diferentes possibilidades de soluções ótimas. Portanto, os resultados dos testes realizados com os exemplares ilustrativos mostraram que os modelos retratam várias situações representadas pelas variações das prioridades das metas.

Experimentos computacionais foram realizados também com dados reais obtidos durante as visitas técnicas. Para os primeiro testes, os valores das metas foram considerados mais relaxados com o objetivo de se obter um melhor resultado na comparação com os dados reais. Posteriormente, outros testes foram realizados com variações dos parâmetros.

Os testes realizados com o método LGP foram organizados considerando-se variações de prioridades conforme as grandezas associadas às metas ([R\$], [km] e [t]). Como as sequências L3 à L6 não retornaram soluções viáveis dentro do tempo de processamento considerado e devido à prioridade do planejamento das empresas estar associado principalmente à previsão de gastos, foram apresentados apenas os resultados dos testes realizados com as sequências L1 e L2, que foram iguais.

Ao comparar os resultados obtidos com os métodos LGP e WGP, observou-se que todos os testes realizados com o método WGP atenderam à meta de coleta por ponto de coleta ($Z_8 = 0$), diferentemente dos resultados apresentados com a utilização do método LGP. Entretanto, em todos os testes com $Z_8 > 0$, desvios associados à venda de fardos e à coleta ao longo do horizonte de planejamento (Z_3 e Z_6) foram menores do que aqueles encontrados com a utilização do método WGP. As soluções ótimas obtidas em todos os testes que apresentaram $Z_8 = 0$ foram iguais para ambos os métodos.

Em se tratando dos custos, a principal diferença foi ao comparar os testes com a possibilidade e impossibilidade de armazenamento de material nos pontos de coleta, sendo estes últimos os que

apresentaram os maiores valores para os custos de estoque. Ao comparar os resultados com os da empresa, em todos os testes os custos de transporte foram menores e os custos de estoque foram no máximo iguais. Verificou-se ainda que há um balanceamento entre os custos de aquisição de material e de estoque. Ao aumentar estes custos, os custos de transporte são minimizados para otimizar o desvio associado à previsão de gastos. Assim, quanto mais limitados os valores das metas, maior é a dificuldade do modelo, principalmente quando a busca pela solução ótima for controlada pela etapa de roteamento.

Verificou-se que, na maioria dos testes, uma viagem por veículo foi suficiente para a coleta do material ao longo do horizonte de planejamento, assim como nos testes realizados considerando-se a variação do número de viagens por veículo, sem alterar o número total de viagens ao longo do horizonte planejamento. Mesmo em testes cuja restrição da capacidade dos veículos foi considerada devido à influência da coleta de outros tipos de resíduos, observou-se a possibilidade de reorganização logística, diminuindo-se o número de viagens por veículo ao longo do horizonte de planejamento. Destaca-se que a diminuição do número de viagens em testes com metas de custo ou distâncias relaxadas não necessariamente minimizam a distância percorrida ou o custo de transporte associado, apenas podem apresentar diferentes possibilidades para auxiliar o gestor à tomar decisões referentes ao planejamento logístico.

Em se tratando das rotas de pontos de coleta diária, os resultados computacionais apontam possibilidades de diminuição dos valores da distância percorrida e dos custos em relação àqueles apresentados pela empresa.

Para analisar o desempenho do modelo no processo de otimização, também foram realizados testes considerando um horizonte de planejamento de 23 períodos. Devido à quantidade de variáveis e restrições, apenas cinco testes apresentaram valores para a relaxação linear. Em se tratando destes testes, os resultados apontam conclusões similares às dos resultados com exemplares menores.

O modelo incorporou metas associadas à sustentabilidade e os resultados se mostraram úteis para auxiliar os gestores em questões econômicas, ambientais e sociais. Observou-se diferentes possibilidades de organização logística de forma a minimizar desvios relacionados à coleta, variações de estoque e produção de fardos para atendimento à demanda e otimização dos custos. Verificou-se, ainda, que as diferentes possibilidades para auxiliar o planejamento logístico otimizam o uso de veículos para a coleta, causando um impacto não só econômico, mas também ambiental ao minimizar a quantidade de gases emitidos. Questões sociais também estão associadas ao processo de otimização apresentado neste estudo, já que o aumento da quantidade coletada aliado ao aumento da demanda podem afetar a carga horária de trabalho e o número de empregos.

Identificou-se nos trabalhos da literatura e durante as visitas técnicas que há variações diárias na quantidade coletada de material disponível para a coleta devido a variações na disponibilidade dos resíduos. Assim, foram realizados testes utilizando uma adaptação do modelo de Programação por Metas *Multi-Choice* Revisada considerando a possibilidade de variações na quantidade disponível de material para a coleta.

Em geral, os resultados encontrados com o modelo de Programação por Metas *Multi-Choice* Revisada foram competitivos em relação ao modelo determinístico, principalmente porque a formulação

permitiu a representação de vários cenários melhorando a análise de sensibilidade da solução. No entanto, de acordo com o cenário, encontrar uma boa solução viável em um modelo sob incerteza pode ser mais difícil do que em um modelo determinístico.

Os vários cenários mostram que os modelos representam situações reais identificadas por meio de entrevistas com os gestores. As variações de coleta, representadas nos vários cenários analisados e encontradas nos resultados com o modelo determinístico e sob incerteza são vivenciadas pelas empresas do ramo. Em alguns períodos, a prioridade é a coleta e quase não há demanda. Em outros, a quantidade disponível para coleta é menor e o material em estoque, coletado em outros períodos, é utilizado para atender à demanda.

Portanto, este trabalho contribui ao apresentar modelos que representam situações reais e propor soluções de potencial auxílio aos tomadores de decisão. Em especial, sugere-se considerar os resultados apresentados para planejar os processos logísticos, cuja organização afeta aspectos não só econômicos, mas também ambientais e sociais.

Sob o ponto de vista científico, a contribuição deste trabalho envolve o desenvolvimento de formulações matemáticas e o uso de métodos e técnicas, que incluem considerações não encontradas nos trabalhos da literatura consultada e identificação por meio de revisão sistemática da literatura de outras possibilidades para trabalhos futuros, não consideradas nesta pesquisa. Para pesquisas futuras sugere-se:

- Considerar outras técnicas para lidar com múltiplos objetivos.
- Incorporar incerteza utilizando outras abordagens como Programação Fuzzy, Programação Estocástica e Programação Robusta.
- Incorporar incerteza em outros parâmetros como demanda e custos.
- Usar abordagens heurísticas tais como Busca Tabu e *Simulated Annealing*.

6.2 PRODUÇÃO CIENTÍFICA

A produção científica desenvolvida está detalhada a seguir:

- Artigos publicados:
 - DEFALQUE, C. M.; SILVA, A. F.; MARINS, F. A. S. Goal Programming Model Applied to Waste Paper Logistics Processes. **Applied Mathematical Modelling**, New York, v. 98, p. 185 - 206, 2021.
 - DEFALQUE, C. M.; MARINS, F. A. S.; SILVA, A. F.; RODRÍGUEZ, E. Y. A. A review of waste paper recycling networks focusing on quantitative methods and sustainability. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, Tokyo, v. 23, p. 55–76, 2021.
 - FURLANETTO, B. V. R.; MARINS, F. A. S.; SILVA, A. F.; DEFALQUE, C. M. Optimization of a logistics network considering allocation of facilities and taxation aspects. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 27, p. 1-28, 2020.

- Trabalhos completos publicados em anais de congresso, participação em eventos e apresentação de trabalhos:
 - DEFALQUE, C.M.; SILVA A. ; MARINS, F. Multiobjective optimization for a waste paper recycling system. In: ESCUELA LATINO AMERICANA DE VERANO EN INVESTIGACIÓN OPERATIVA, XXIII, 2019, Lleida. **Pôster..** Lleida: Universidad de Lleida, 2019.
 - DEFALQUE, C.M.; MARINS, F. ; SILVA, A. A Review of Optimization Methods in Solid Waste Management: Identifying Gaps in the Literature Focusing on Sustainable Development and Uncertainty. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 50, 2018, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: PUC, 2018.
 - DEFALQUE, C.M.; MARINS, F. ; SILVA, A. A Programação por metas para a otimização de um processo logístico de aparas de papel. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 50, 2018, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: PUC, 2018.

REFERÊNCIAS

- ABDELAZIZ, F. B.; AOUNI, B.; FAYEDH, R. E. Multi-objective stochastic programming for portfolio selection. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 177, n. 3, p. 1811–1823, 2007.
- ABDOLI, B.; MIRHASSANI, S. A.; HOOSHMAND, F. Model and algorithm for bi-fuel vehicle routing problem to reduce GHG emissions. **Environmental Science and Pollution Research**, Heidelberg, v. 24, p. 21610–21624, 2017.
- AGRAWAL, S.; SINGH, R. K.; MURTAZA, Q. A literature review and perspectives in reverse logistics. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 97, p. 76–92, 2015.
- AHLUWALIA, P. K.; NEMA, A. K. Multi-objective reverse logistics model for integrated computer waste management. **Waste Management and Research**, London, v. 24, n. 6, p. 514–527, 2006.
- AHLUWALIA, P. K.; NEMA, A. K. Capacity planning for electronic waste management facilities under uncertainty: multi-objective multi-time-step model development. **Waste Management and Research**, London, v. 29, n. 7, p. 694–709, 2011.
- AKÇALI, E.; ÇETINKAYA, S.; ÜSTER, H. Network design for reverse and closed-loop supply chains: An annotated bibliography of models and solution approaches. **Networks**, Hoboken, v. 53, n. 3, p. 231–248, 2009.
- ALEM, D. **Programação estocástica e otimização robusta no planejamento da produção de empresas moveleiras**. 208 p. Tese (Doutorado) — Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/55/55134/tde-29112011-162103/publico/alem.pdf>>. Acesso em: 17 de dez. de 2019.
- ALEM, D.; MORABITO, R. Planejamento da produção sob incerteza: programação estocástica versus otimização robusta. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 22, n. 3, p. 539–551, 2015.
- ALTMANN, M.; BOGASCHEWSKY, R. An environmentally conscious robust closed-loop supply chain design. **Journal of Business Economics**, Wiesbaden, v. 84, p. 613–637, 2014.
- ALUMUR, S. A. et al. Multi-period reverse logistics network design. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 220, n. 1, p. 67–78, 2012.
- ALWAELI, M. An Economic Analysis of Joined Costs and Beneficial Effects of Waste Recycling. **Environment Protection Engineering**, Wroclaw, v. 37, n. 4, p. 91–103, 2011.
- ALWAELI, M. An Overview of Municipal Solid Waste Management in Poland. The Current Situation, Problems and Challenges. **Environment Protection Engineering**, Wroclaw, v. 41, n. 4, p. 181–193, 2015.
- AMALNICK, M. S.; SAFFAR, M. M. A new fuzzy mathematical model for green supply chain network design. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, North Vancouver, v. 8, n. 1, p. 45–70, 2017.
- AMEKNASSI, L.; AIT-KADI, D.; REZG, N. Integration of logistics outsourcing decisions in a green supply chain design: A stochastic multi-objective multi-period multi-product programming model. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 182, p. 165–184, 2016.
- AMIN, S. H.; BAKI, F. A facility location model for global closed-loop supply chain network design. **Applied Mathematical Modelling**, New York, v. 41, p. 316–330, 2017.

- AMIN, S. H.; ZHANG, G. A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. **Applied Mathematical Modelling**, New York, v. 37, n. 6, p. 4165–4176, 2013.
- AMIN, S. H.; ZHANG, G. A three-stage model for closed-loop supply chain configuration under uncertainty. **International Journal of Production Research**, Abingdon, Oxfordshire, v. 51, n. 5, p. 1405–1425, 2013.
- ANGHINOLFI, D. et al. A dynamic optimization model for solid waste recycling. **Waste Management**, Oxford, v. 33, n. 2, p. 287–296, 2013.
- ANGUTI ESTATÍSTICA. **Relatório Anual da Associação Nacional de Aparistas de Papel 2018-2019**. Brasil: Associação Nacional de Aparistas de Papel, 2018. 42 p. Disponível em: <<https://anap.org.br/website/wp-content/uploads/2019/08/relatorio-estatstico-2018.pdf>>. Acesso em: 20 de out. de 2019.
- ARENALES, M. et al. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Elsevier : ABEPRO - Campus, 2006. 544 p.
- ASIM, Z.; JALIL, S. A.; JAVAID, S. An uncertain model for integrated production-transportation closed-loop supply chain network with cost reliability. **Sustainable Production and Consumption**, Amsterdam, v. 17, p. 298–310, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. Brasil: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2015. 92 p. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/download-panorama-2015/>>. Acesso em: 02 de fev. de 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15484**: Aparas de papel e papelão ondulado - determinação do teor de umidade - método por secagem em estufa. Brasil, 2007. 7 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15483**: Aparas de papel e papelão ondulado - classificação. Brasil, 2009. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - princípios e estrutura. Brasil, 2009. 22 p.
- BABAZADEH, R.; JOLAI, F.; RAZMI, J. Developing scenario-based robust optimisation approaches for the reverse logistics network design problem under uncertain environments. **International Journal of Services and Operations Management**, Bucks, v. 20, n. 4, p. 418–440, 2015.
- BABAZADEH, R. et al. A sustainable second-generation biodiesel supply chain network design problem under risk. **Omega**, Oxford, v. 66, p. 258–277, 2017.
- BAL, A.; SATOGLU, S. I. A goal programming model for sustainable reverse logistics operations planning and an application. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 201, p. 1081–1091, 2018.
- BARBOSA-PÓVOA, A. P.; SILVA, C. da; CARVALHO, A. Opportunities and challenges in sustainable supply chain: An operations research perspective. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 268, n. 2, p. 399–431, 2018.
- BARROS, A. I.; DEKKER, R.; SCHOLTEN, V. A two-level network for recycling sand: A case study. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 110, n. 2, p. 199–214, 1998.

- BERGLUND, C.; SÖDERHOLM, P. Complementing Empirical Evidence on Global Recycling and Trade of Waste Paper. **World Development**, Oxford, v. 31, n. 4, p. 743–754, 2003.
- BERGLUND, C.; SÖDERHOLM, P.; NILSSON, M. A note on inter-country differences in waste paper recovery and utilization. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 34, n. 3, p. 175–191, 2002.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations Management Research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, Bingley, v. 22, n. 2, p. 241–264, 2002.
- BING, X. et al. Research challenges in municipal solid waste logistics management. **Waste Management**, Oxford, v. 48, p. 584–592, 2016.
- BLOEMHOF-RUWAARD, J. et al. An environmental life cycle optimization model for the European pulp and paper industry. **Omega**, Oxford, v. 24, n. 6, p. 615–629, 1996.
- BOGH, M. B.; MIKKELSEN, H.; WOHLK, S. Collection of recyclables from cubes - A case study. **Socio-Economic Planning Sciences**, Oxford, v. 48, n. 2, p. 127–134, 2014.
- BOUKHERROUB, T. et al. An integrated approach for sustainable supply chain planning. **Computers and Operations Research**, Oxford, v. 54, p. 180–194, 2015.
- BRASIL. Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Presidência da República, Brasília, DF, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7404.htm>. Acesso em: 18 de dez. de 2019.
- BRASIL. Ministério da Infraestrutura. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Quadro de fabricantes de veículos. **Diretoria de Infraestrutura Rodoviária. Coordenação Geral de Operações Rodoviárias**, Brasil, p. 1–114, 2009. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/Pesagem/sis_sgpv/QFV/QFV%202009.pdf>. Acesso em: 17 de ago. de 2019.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Série histórica do levantamento de preços. **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**, Brasil, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrencia/precos/precos-revenda-e-de-distribuicao-combustiveis/serie-historica-do-levantamento-de-precos>>. Acesso em: 07 de maio de 2021.
- BROOKE, A.; KENDRICK, D.; MEERAUS, A. **Gams: Sistema Geral de Modelagem Algébrica**. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1997. 279 p.
- BYSTRÖM, S.; LÖNNSTEDT, L. Paper recycling: environmental and economic impact. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 21, n. 2, p. 109–127, 1997.
- CABALLERO, R.; GÓMEZ, T.; RUIZ, F. Goal Programming: realistic targets for the near future. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, Oxford, v. 16, n. 3-4, p. 79–110, 2009.
- CARUSO, C.; COLORNI, A.; PARUCCINI, M. The regional urban solid waste management system: A modelling approach. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 70, n. 1, p. 16–30, 1993.
- CHANG, C.-T. Multi-choice goal programming. **Omega**, Oxford, v. 35, n. 4, p. 389–396, 2007.

CHANG, C.-T. Revised multi-choice goal programming. **Applied Mathematical Modelling**, New York, v. 32, n. 12, p. 2587–2595, 2008.

CHARNES, A.; COOPER, W. W. **Management models and industrial applications of linear programming**. New York: Wiley, 1961. v. 1.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; FERGUSON, R. O. Optimal Estimation of Executive Compensation by Linear Programming. **Management Science**, Catonsville, v. 1, n. 2, p. 138–151, 1955.

CHEN, K.-h.; LIAO, C.-n.; WU, L.-c. A Selection Model to Logistic Centers Based on TOPSIS and MCGP Methods: The Case of Airline Industry. **Journal of Applied Mathematics**, London, v. 2014, p. 1–10, 2014.

CHEN, Y.-W. et al. A particle swarm approach for optimizing a multi-stage closed loop supply chain for the solar cell industry. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Oxford, v. 43, p. 111–123, 2017.

CHEUNG, W. M.; PACHISIA, V. Facilitating waste paper recycling and repurposing via cost modelling of machine failure, labour availability and waste quantity. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 101, p. 34–41, 2015.

COLAPINTO, C.; JAYARAMAN, R.; MARSIGLIO, S. Multi-criteria decision analysis with goal programming in engineering, management and social sciences: a state-of-the art review. **Annals of Operations Research**, New York, v. 251, p. 7–40, 2017.

COLLETTE, Y.; SIARRY, P. **Multiobjective Optimization: Principles and Case Studies**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004. 293 p. (Decision Engineering). ISBN 978-3-662-08883-8.

CORMIER, D.; MAGNAN, M. Investors' assessment of implicit environmental liabilities: An empirical investigation. **Journal of Accounting and Public Policy**, New York, v. 16, n. 2, p. 215–241, 1997.

COUTO, C. Qual a diferença de peso a seco e em ordem de marcha? **Quatro Rodas**, Brasil, 2016. Disponível em: <https://quatrorodas.abril.com.br/auto-servico/qual-a-diferenca-entre-peso-a-seco-e-em-ordem-de-marcha/>. Acesso em: 17 de ago. de 2019.

COUTO, M. C. L. et al. Planning the location of facilities to implement a reverse logistic system of post-consumer packaging using a location mathematical model. **Waste Management and Research**, London, v. 35, n. 12, p. 1254–1265, 2017.

DAI, Z. Multi-objective fuzzy design of closed-loop supply chain network considering risks and environmental impact. **Human and Ecological Risk Assessment**, New York, v. 22, n. 4, p. 845–873, 2016.

DAI, Z.; DAI, H.-M. Bi-objective closed-loop supply chain network design with risks in a fuzzy environment. **Journal of Industrial and Production Engineering**, Singapore, v. 33, n. 3, p. 169–180, 2016.

DAI, Z.; LI, Z. Design of a dynamic closed-loop supply chain network using fuzzy bi-objective linear programming approach. **Journal of Industrial and Production Engineering**, Singapore, v. 34, n. 5, p. 330–343, 2017.

DEFALQUE, C. M. et al. A review of waste paper recycling networks focusing on quantitative methods and sustainability. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, Tokyo, v. 23, p. 55–76, 2021.

- DEFALQUE, C. M.; RANGEL, S.; FERREIRA, D. Usando o ATSP na Modelagem do Problema Integrado de Produção de Bebidas. **TEMA - Tendências em Matemática Aplicada e Computacional**, São Carlos, v. 12, n. 3, p. 195–209, 2011.
- DEFALQUE, C. M.; SILVA, A. F.; MARINS, F. A. S. Goal Programming Model Applied to Waste Paper Logistics Processes. **Applied Mathematical Modelling**, New York, v. 98, p. 185–206, 2021.
- DEKKER, R.; BLOEMHOF, J.; MALLIDIS, I. Operations Research for green logistics - An overview of aspects, issues, contributions and challenges. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 219, n. 3, p. 671–679, 2012.
- DEKKER, R. et al. Quantitative Models for Reverse Logistics Decision Making. In: DEKKER, R. et al. (Ed.). **Reverse Logistics: Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chains**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004. cap. 2th, p. 34. ISBN 978-3-642-07380-9.
- DEMIREL, N. et al. A genetic algorithm approach for optimising a closed-loop supply chain network with crisp and fuzzy objectives. **International Journal of Production Research**, Abingdon, Oxfordshire, v. 52, n. 12, p. 3637–3664, 2014.
- DESROCHERS, M.; LAPORTE, G. Improvements and extensions to the Miller-Tucker-Zemlin subtour elimination constraints. **Operations Research Letters**, Amsterdam, v. 10, n. 1, p. 27–36, 1991.
- DIJKGRAAF, E.; GRADUS, R. H. J. M. The Effectiveness of Dutch Municipal Recycling Policies. **Tinbergen Institute Discussion Paper 14-155/VI (Rotterdam, Amsterdam, Netherlands)**. SSRN, 2014.
- ELKINGTON, J. **Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business**. Oxford: Capstone, 1997. 402 p.
- ENTEZAMINIA, A.; HEIDARI, M.; RAHMANI, D. Robust aggregate production planning in a green supply chain under uncertainty considering reverse logistics: a case study. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 90, p. 1507–1528, 2017.
- ERVASTI, I.; MIRANDA, R.; KAURANEN, I. A global, comprehensive review of literature related to paper recycling: A pressing need for a uniform system of terms and definitions. **Waste Management**, Oxford, v. 48, p. 64–71, 2016.
- ERVASTI, I.; MIRANDA, R.; KAURANEN, I. Paper recycling framework, the “Wheel of Fiber”. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 174, p. 35–44, 2016.
- FARROKHI-ASL, H. et al. Metaheuristics for a bi-objective location-routing-problem in waste collection management. **Journal of Industrial and Production Engineering**, Singapore, v. 34, n. 4, p. 239–252, 2017.
- FEITÓ-CESPÓN, M. et al. Redesign of a sustainable reverse supply chain under uncertainty: A case study. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 151, p. 206–217, 2017.
- FLEISCHMANN, M. et al. The Impact of Product Recovery on Logistics Network Design. **Production and Operations Management**, Hoboken, v. 10, n. 2, p. 156–173, 2001.
- FLEISCHMANN, M. et al. Reverse Logistics Network Design. In: DEKKER, R. et al. (Ed.). **Reverse Logistics: Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chains**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004. cap. 4th, p. 83–87. ISBN 978-3-642-07380-9.
- FLEISCHMANN, M. et al. Quantitative models for reverse logistics: A review. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 103, n. 1, p. 1–17, 1997.

- FLEISCHMANN, M. et al. A characterisation of logistics networks for product recovery. **Omega**, Oxford, v. 28, n. 6, p. 653–666, 2000.
- FROTA NETO, J. Q. et al. Designing and evaluating sustainable logistics networks. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 111, n. 2, p. 195–208, 2008.
- GAMS DEVELOPMENT CORPORATION. **General Algebraic Modeling System (GAMS) Release 23.6.5**. United States: GAMS Development Corporation, 2011. Disponível em: <https://www.gams.com/latest/docs/RN_236.html>. Acesso em: 01 de maio de 2017.
- GAMS DEVELOPMENT CORPORATION. **User's Guide**. United States: GAMS Development Corporation, 2021. Disponível em: <https://www.gams.com/latest/docs/UG_MAIN.html#UG_Language_Environment>. Acesso em: 07 de maio de 2021.
- GEORGIADIS, P. An integrated system dynamics model for strategic capacity planning in closed-loop recycling networks: A dynamic analysis for the paper industry. **Simulation Modelling Practice and Theory**, Amsterdam, v. 32, p. 116–137, 2013.
- GHINEA, C. et al. Life Cycle Assessment of Waste Management and Recycled Paper Systems. **Environmental engineering and management journal**, Iasi, v. 13, n. 8, p. 2073–2085, 2014.
- GHORBANI, M.; ARABZAD, S. M.; TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R. A multi-objective fuzzy goal programming model for reverse supply chain design. **International Journal of Operational Research**, Bucks, v. 19, n. 2, p. 141–153, 2014.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1991.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- GLASSEY, C. R.; GUPTA, V. K. A Linear Programming Analysis of Paper Recycling. **Management Science**, Catonsville, v. 21, n. 4, p. 392–408, 1974.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização Combinatória e Programação Linear: Modelos e Algoritmos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.
- GOORAN, A. N.; RAFIEI, H.; RABANI, M. Modeling risk and uncertainty in designing reverse logistics problem. **Decision Science Letters**, North Vancouver, v. 7, p. 13–24, 2018.
- GOVINDAN, K. et al. Fuzzy multi-objective approach for optimal selection of suppliers and transportation decisions in an eco-efficient closed loop supply chain network. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 165, p. 1598–1619, 2017.
- GOVINDAN, K.; FATTAHI, M. Investigating risk and robustness measures for supply chain network design under demand uncertainty: A case study of glass supply chain. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 183, p. 680–699, 2017.
- GOVINDAN, K.; FATTAHI, M.; KEYVANSHOKOOH, E. Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 263, n. 1, p. 108–141, 2017.
- GOVINDAN, K.; JHA, P. C.; GARG, K. Product recovery optimization in closed-loop supply chain to improve sustainability in manufacturing. **International Journal of Production Research**, Abingdon, Oxfordshire, v. 54, n. 5, p. 1463–1486, 2016.
- GOVINDAN, K. et al. An Integrated Hybrid Approach for Circular supplier selection and Closed loop Supply Chain Network Design under Uncertainty. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 242, p. ., 2020.

- GOVINDAN, K.; PAAM, P.; ABTAHI, A.-R. A fuzzy multi-objective optimization model for sustainable reverse logistics network design. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 67, p. 753–768, 2016.
- GOVINDAN, K.; SOLEIMANI, H. A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: a Journal of Cleaner Production focus. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 142, p. 371–384, 2017.
- GOVINDAN, K.; SOLEIMANI, H.; KANNAN, D. Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 240, n. 3, p. 603–626, 2015.
- GUPTA, A.; EVANS, G. W. A goal programming model for the operation of closed-loop supply chains. **Engineering Optimization**, Abingdon, Oxfordshire, v. 41, n. 8, p. 713–735, 2009.
- GUTBERLET, J. Cooperative urban mining in Brazil: Collective practices in selective household waste collection and recycling. **Waste Management**, Oxford, v. 45, p. 22–31, 2015.
- HAHLER, S.; FLEISCHMANN, M. Strategic Grading in the Product Acquisition Process of a Reverse Supply Chain. **Production and Operations Management**, Hoboken, v. 26, n. 8, p. 1498–1511, 2017.
- HART, A. et al. Use of Life Cycle Assessment to Develop Industrial Ecologies—A Case Study. **Process Safety and Environmental Protection**, London, v. 83, n. 4, p. 359–363, 2005.
- HO, H.-P. The supplier selection problem of a manufacturing company using the weighted multi-choice goal programming and MINMAX multi-choice goal programming. **Applied Mathematical Modelling**, New York, v. 75, p. 819–836, 2019.
- HOORNWEG, D.; BHADA-TATA, P. What a waste: A global review of solid waste management. **Urban Development Series; Knowledge Papers n° 15**, World Bank, Washington, DC, p. 116, 2012. Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17388>>. Acesso em: 06 de out. de 2017.
- HOSSEINZADEH, M.; ROGHANIAN, E. An Optimization Model for Reverse Logistics Network under Stochastic Environment Using Genetic Algorithm. **International Journal of Business and Social Science**, New York, v. 3, n. 12, p. 249–264, 2012.
- IBM. **IBM ILOG CPLEX 12.2.0.2**. United States: IBM, 2011. Disponível em: <https://www.ibm.com/support/pages/node/308563?mhsrc=ibmsearch_a&mhq=DOWNLOAD%20CPLEX%2012.2.0.2>.
- IBM. **User's Manual for IBM ILOG CPLEX. Threads**. United States: IBM, 2017. 371–374 p. Disponível em: <https://www.ibm.com/docs/en/SSSA5P_12.7.1/ilog.odms.studio.help/pdf/usrcplex.pdf>. Acesso em: 15 de nov. de 2019.
- IBM. **IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Academic Research Edition Fix Pack 12.2.0.2**. United States: IBM, 2018. Disponível em: <<https://www.ibm.com/support/pages/ibm-ilog-cplex-optimization-studio-academic-research-edition-fix-pack-12202>>. Acesso em: 15 de nov. de 2019.
- ILGIN, M. A.; GUPTA, S. M. Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 91, n. 3, p. 563–591, 2010.

- IPIECA/API. **Oil and Gas Industry Guidance on Voluntary Sustainability Reporting**: Using environmental , health & safety , social and economic performance indicators. London, United Kingdom and Washington DC, US: International Petroleum Industry Environmental Conservation Association (IPIECA) and American Petroleum Institute (API), 2005. 74 p. Iniciativa endossada por International Association of Oil & Gas Producers. Disponível em: <http://www.ingenieroambiental.com/4030/reporting_guide.pdf>. Acesso em: 06 de out. de 2017.
- JAEHN, F.; JUOPPERI, R. A Description of Supply Chain Planning Problems in the Paper Industry with Literature Review. **Asia-Pacific Journal of Operational Research**, Singapore, v. 36, n. 1, 2019.
- JOHN, S. T.; SRIDHARAN, R.; KUMAR, P. N. R. Multi-period reverse logistics network design with emission cost. **The International Journal of Logistics Management**, Bingley, v. 28, n. 1, p. 127–149, 2017.
- KANG, K.; WANG, X.; MA, Y. A Collection-Distribution Center Location and Allocation Optimization Model in Closed-Loop Supply Chain for Chinese Beer Industry. **Mathematical Problems in Engineering**, London, v. 2017, p. 1–15, 2017.
- KARA, S. S.; ONUT, S. A stochastic optimization approach for paper recycling reverse logistics network design under uncertainty. **International Journal of Environmental Science and Technology**, Tehran, v. 7, p. 717–730, 2010.
- KARA, S. S.; ONUT, S. A two-stage stochastic and robust programming approach to strategic planning of a reverse supply network: The case of paper recycling. **Expert Systems with Applications**, Oxford, v. 37, n. 9, p. 6129–6137, 2010.
- KARGAR, S.; POURMEHDI, M.; PAYDAR, M. M. Reverse logistics network design for medical waste management in the epidemic outbreak of the novel coronavirus (COVID-19). **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 746, p. ., 2020.
- KAYVANFAR, V. et al. Analysis of a multi-echelon supply chain problem using revised multi-choice goal programming approach. **Kybernetes**, Bingley, v. 47, n. 1, p. 118–141, 2018.
- KAZEMI, N.; MODAK, N. M.; GOVINDAN, K. A review of reverse logistics and closed loop supply chain management studies published in IJPR: a bibliometric and content analysis. **International Journal of Production Research**, Abingdon, Oxfordshire, v. 57, n. 15-16, p. 4937–4960, 2019.
- KLEINEIDAM, U. et al. Optimising product recycling chains by control theory. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 66, n. 2, p. 185–195, 2000.
- KUSUMASTUTI, R. D.; PIPLANI, R.; LIM, G. H. Designing reverse logistics network for product recovery. **International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling**, Bucks, v. 1, n. 4, p. 257–289, 2009.
- LAPORTE, G. The traveling salesman problem: An overview of exact and approximate algorithms. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 59, n. 2, p. 231–247, 1992.
- LEU, H. G.; LIN, S. H. Cost-benefit analysis of resource material recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 23, n. 3, p. 183–192, 1998.
- LI, M. et al. Optimization design of multi-echelon recycling networks for third-party reverse logistics provider in the context of binary path selection. **Academic Journal of Manufacturing Engineering**, Timisoara, v. 16, n. 1, p. 97–105, 2018.

LYEME, H. A.; MUSHI, A.; NKANSAH-GYEKYE, Y. Implementation of a goal programming model for solid waste management: a case study of Dar es Salaam – Tanzania. **International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization**, Les Ulis, v. 8, n. A2, p. ., 2017.

LYEME, H. A.; MUSHI, A.; NKANSAH-GYEKYE, Y. Review of multi-objective optimization models for solid waste management systems with environmental considerations. **Journal of Mathematical and Computational Science**, London, v. 7, n. 1, p. 150–174, 2017.

MA, R. et al. Robust environmental closed-loop supply chain design under uncertainty. **Chaos, Solitons and Fractals**, Oxford, v. 89, p. 195–202, 2016.

MARQUES, H. R. et al. **Metodologia da Pesquisa e do Trabalho Científico**. 4. ed. Campo Grande: UCDB, 2014. 136 p. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/304203726>>. Acesso em: 14 de out. de 2020.

MEHRBOD, M.; TU, N.; MIAO, L. A hybrid solution approach for a multi-objective closed-loop logistics network under uncertainty. **Journal of Industrial Engineering International**, Heidelberg, v. 11, p. 237–252, 2015.

MEHRBOD, M. et al. Interactive fuzzy goal programming for a multi-objective closed-loop logistics network. **Annals of Operations Research**, New York, v. 201, p. 367–381, 2012.

MELARÉ, A. V. d. S. et al. Technologies and decision support systems to aid solid-waste management: a systematic review. **Waste Management**, Oxford, v. 59, p. 567–584, 2017.

MELO, M.; NICKEL, S.; Saldanha-da-Gama, F. Facility location and supply chain management – A review. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 196, n. 2, p. 401–412, 2009.

MELO, R. A.; RODRIGUEZ T, D.; ZARRUK, D. **Package gmapsdistance**: Distance and travel time between two points from google maps. CRAN - Repository, 2018. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/gmapsdistance>>. Acesso em: 08 de set. de 2017.

MILLER, C. E.; TUCKER, A. W.; ZEMLIN, R. A. Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems. **Journal of the ACM**, New York, v. 7, n. 4, p. 326–329, 1960.

MIRANDA, R.; MONTE, M. C.; BLANCO, A. Impact of increased collection rates and the use of commingled collection systems on the quality of recovered paper. Part 1: Increased collection rates. **Waste Management**, Oxford, v. 31, n. 11, p. 2208–2216, 2011.

NIELSEN, L. **Classifications of Countries Based on Their Level of Development**: How it is done and how it could be done. Washington: International Monetary Fund, 2011. 46 p. Disponível em: <<https://www.imf.org/external/pubs/ft/wp/2011/wp1131.pdf>>. Acesso em: 28 de dez. de 2019.

OECD. **Environment at a Glance 2015**: OECD indicators. Paris: OECD Publishing, 2015. 104 p. Disponível em: <https://www.oecd-ilibrary.org/environment/environment-at-a-glance-2015_9789264235199-en>. Acesso em: 06 de out. de 2017.

ÖZCEYLAN, E.; PAKSOY, T. Fuzzy multi-objective linear programming approach for optimising a closed-loop supply chain network. **International Journal of Production Research**, Abingdon, Oxfordshire, United Kingdom, v. 51, n. 8, p. 2443–2461, 2013.

ÖZCEYLAN, E.; PAKSOY, T. Interactive fuzzy programming approaches to the strategic and tactical planning of a closed-loop supply chain under uncertainty. **International Journal of Production Research**, Abingdon, Oxfordshire, v. 52, n. 8, p. 2363–2387, 2014.

- ÖZKİR, V.; BAŞLIGİL, H. Multi-objective optimization of closed-loop supply chains in uncertain environment. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 41, p. 114–125, 2013.
- PAKSOY, T.; PEHLIVAN, N. Y.; ÖZCEYLAN, E. Fuzzy Multi-Objective Optimization of a Green Supply Chain Network with Risk Management that Includes Environmental Hazards. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, New York, v. 18, n. 5, p. 1120–1151, 2012.
- PATI, R. K.; VRAT, P. Economic paper blending optimization model with competing materials. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, Bingley, v. 21, n. 5, p. 602–617, 2010.
- PATI, R. K.; VRAT, P.; KUMAR, P. Cost optimisation model in recycled waste reverse logistics system. **International Journal of Business Performance Management**, Bucks, v. 6, n. 3/4, p. 245–261, 2004.
- PATI, R. K.; VRAT, P.; KUMAR, P. Economic analysis of paper recycling vis-à-vis wood as raw material. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 103, n. 2, p. 489–508, 2006.
- PATI, R. K.; VRAT, P.; KUMAR, P. Integrated chain analysis of recycled vis-à-vis wood pulp paper industry: An Indian manufacturer viewpoint. **International Journal of Value Chain Management**, Bucks, v. 1, n. 1, p. 44–63, 2006.
- PATI, R. K.; VRAT, P.; KUMAR, P. Three-win strategy with optimisation approach for recycled paper manufacturer. **International Journal of Environment and Waste Management**, Bucks, v. 1, n. 2/3, p. 269 – 290, 2007.
- PATI, R. K.; VRAT, P.; KUMAR, P. A goal programming model for paper recycling system. **Omega**, Oxford, v. 36, n. 3, p. 405–417, 2008.
- PATI, R. K.; VRAT, P.; KUMAR, P. A MILP Model for design of paper recycling network. **International Journal of Ecology & Development**, Uttarakhand, v. 9, n. W08, p. 69–86, 2008.
- PATI, R. K.; VRAT, P.; KUMAR, P. Decision-Making Model For Economical Wastepaper Collection. **Productivity : A Quarterly Journal of The National Productivity Council**, New Delhi, v. 49, n. 4, p. 265–271, 2009.
- PAYDAR, M. M.; BABAVEISI, V.; SAFAEI, A. S. An engine oil closed-loop supply chain design considering collection risk. **Computers and Chemical Engineering**, Shannon, v. 104, p. 38–55, 2017.
- PAYDAR, M. M.; SAIDI-MEHRABAD, M. Revised multi-choice goal programming for integrated supply chain design and dynamic virtual cell formation with fuzzy parameters. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, Abingdon, Oxfordshire, v. 28, n. 3, p. 251–265, 2015.
- PISHVAEE, M. S.; RABBANI, M.; TORABI, S. A. A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. **Applied Mathematical Modelling**, New York, v. 35, n. 2, p. 637–649, 2011.
- PISHVAEE, M. S.; TORABI, S. A. A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty. **Fuzzy Sets and Systems**, Amsterdam, v. 161, n. 20, p. 2668–2683, 2010.
- QAHTANI, H. A. et al. A Goal Programming Approach to Multichoice Multiobjective Stochastic Transportation Problems with Extreme Value Distribution. **Advances in Operations Research**, London, v. 2019, p. 1–6, 2019.

- RAHMANI-AHRANJANI, A. et al. Managing Environmentally Conscious in Designing Closed-loop Supply Chain for the Paper Industry. **International Journal of Engineering, Transactions A: Basics**, Tehran, v. 30, n. 7, p. 1038–1047, 2017.
- RAHMANI-AHRANJANI, A. et al. Sustainability in paper industry closed-loop supply chain (Case study: East Azerbaijan province, Iran). **Journal of Industrial and Systems Engineering**, Tehran, v. 10, n. 3, p. 33–49, 2017.
- RAHMANI-AHRANJANI, A. et al. Closed-loop supply chain network design for the paper industry: A multi-objective stochastic robust approach. **Scientia Iranica, Transactions E: Industrial Engineering**, Tehran, v. 25, n. 5, p. 2881–2903, 2018.
- RAJEEV, A. et al. Evolution of sustainability in supply chain management: A literature review. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 162, p. 299–314, 2017.
- RAMEZANI, M. et al. Closed-loop supply chain network design under a fuzzy environment. **Knowledge-Based Systems**, Amsterdam, v. 59, p. 108–120, 2014.
- RINSATITNON, N. et al. Reverse logistics implementation in the construction industry: Paper waste focus. **Songklanakarin Journal of Science and Technology**, Hat Yai, v. 40, n. 4, p. 798–805, 2018.
- ROGHANIAN, E.; PAZHOHESHFAR, P. An optimization model for reverse logistics network under stochastic environment by using genetic algorithm. **Journal of Manufacturing Systems**, London, v. 33, n. 3, p. 348–356, 2014.
- ROMERO, C. Extended lexicographic goal programming: unifying approach. **Omega**, Oxford, v. 29, p. 63–71, 2001.
- ROMERO, C. A general structure of achievement function for a goal programming model. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 153, n. 3, p. 675–686, 2004.
- ROSTAMI, A.; PAYDAR, M. M.; ASADI-GANGRAJ, E. A hybrid genetic algorithm for integrating virtual cellular manufacturing with supply chain management considering new product development. **Computers and Industrial Engineering**, Oxford, v. 145, 2020.
- RUBEM, A. P. d. S.; MELLO, J. C. C. S. d.; MEZA, L. A. A goal programming approach to solve the multiple criteria DEA model. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 260, n. 1, p. 134–139, 2017.
- RUTKOWSKI, J. E.; RUTKOWSKI, E. W. Recycling in Brasil: Paper and Plastic Supply Chain. **Resources**, Basel, v. 6, n. 3, p. 43, 2017.
- SAFAEI, A. S.; ROOZBEH, A.; PAYDAR, M. M. A robust optimization model for the design of a cardboard closed-loop supply chain. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 166, p. 1154–1168, 2017.
- SAHAMIE, R.; STINDT, D.; NUSS, C. Transdisciplinary Research in Sustainable Operations - An Application to Closed-Loop Supply Chains. **Business Strategy and the Environment**, Oxford, v. 22, n. 4, p. 245–268, 2013.
- SALEMA, M. I.; POVOA, A. P. B.; NOVAIS, A. Q. A warehouse-based design model for reverse logistics. **Journal of the Operational Research Society**, London, v. 57, n. 6, p. 615–629, 2006.
- SALEMA, M. I. G.; BARBOSA-PÓVOA, A. P.; NOVAIS, A. Q. An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 179, n. 3, p. 1063–1077, 2007.

SCHMIDT, J. H. et al. Life cycle assessment of the waste hierarchy – A Danish case study on waste paper. **Waste Management**, Oxford, v. 27, n. 11, p. 1519–1530, 2007.

SCHWEIGER, K.; SAHAMIE, R. A hybrid Tabu Search approach for the design of a paper recycling network. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, Oxford, v. 50, p. 98–119, 2013.

SCOPUS. **Scopus database**. Elsevier B. V., 2019. Disponível em: <www.scopus.com>. Acesso em: 30 de set. de 2019.

SEVIGNÉ-ITOIZ, E. et al. Methodology of supporting decision-making of waste management with material flow analysis (MFA) and consequential life cycle assessment (CLCA): case study of waste paper recycling. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 105, p. 253–262, 2015.

SHALKE, P. N.; PAYDAR, M. M.; HAJIAGHAEI-KESHTALI, M. Sustainable supplier selection and order allocation through quantity discounts. **International Journal of Management Science and Engineering Management**, Abingdon, Oxfordshire, v. 13, n. 1, p. 20–32, 2018.

SHARMA, N. et al. Analysis of bullwhip effect in reverse supply chain. **Journal of Advances in Management Research**, Bingley, v. 3, n. 2, p. 18–33, 2006.

SHARMA, V. K.; VAN BEUKERING, P.; NAG, B. Environmental and economic policy analysis of waste paper trade and recycling in India. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 21, n. 1, p. 55–70, 1997.

SHEN, C.-W.; PENG, Y.-T.; TU, C.-S. Considering Product Life Cycle Cost Purchasing Strategy for Solving Vendor Selection Problems. **Sustainability**, Basel, v. 11, n. 13, p. 3739, 2019.

SHERIFF, K. M. M. et al. Integrated optimization model and methodology for plastics recycling: Indian empirical evidence. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 153, p. 707–717, 2017.

SILVA, A. F.; MARINS, F. A. S. Revisão da literatura sobre modelos de Programação por Metas determinística e sob incerteza. **Production**, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 92–112, 2015.

SILVA, A. F.; MARINS, F. A. S.; DIAS, E. X. Addressing uncertainty in sugarcane harvest planning through a revised multi-choice goal programming model. **Applied Mathematical Modelling**, New York, v. 39, n. 18, p. 5540–5558, 2015.

SINGH, A.; TRIVEDI, A. Sustainable green supply chain management: trends and current practices. **Competitiveness Review**, Bingley, v. 26, n. 3, p. 265–288, 2016.

SINGH, S.; SONIA. Multi-choice programming: an overview of theories and applications. **Optimization**, Abingdon, Oxfordshire, v. 66, n. 10, p. 1713–1738, 2017.

SOLEIMANI, H. et al. Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design. **Computers and Industrial Engineering**, Oxford, v. 109, p. 191–203, 2017.

STINDT, D.; SAHAMIE, R. Review of research on closed loop supply chain management in the process industry. **Flexible Services and Manufacturing Journal**, New York, v. 26, p. 268–293, 2014.

SUBULAN, K. et al. A case-oriented approach to a lead/acid battery closed-loop supply chain network design under risk and uncertainty. **Journal of Manufacturing Systems**, London, v. 37, p. 340–361, 2015.

SUBULAN, K.; TASAN, A. S.; BAYKASOGLU, A. A fuzzy goal programming model to strategic planning problem of a lead/acid battery closed-loop supply chain. **Journal of Manufacturing Systems**, London, v. 37, p. 243–264, 2015.

- SUBULAN, K.; TASAN, A. S.; BAYKASOGLU, A. Designing an environmentally conscious tire closed-loop supply chain network with multiple recovery options using interactive fuzzy goal programming. **Applied Mathematical Modelling**, New York, v. 39, n. 9, p. 2661–2702, 2015.
- SUYABATMAZ, A. C.; ALTEKIN, F. T.; SAHIN, G. Hybrid simulation-analytical modeling approaches for the reverse logistics network design of a third-party logistics provider. **Computers and Industrial Engineering**, Oxford, v. 70, p. 74–89, 2014.
- T&A CONSULTING. **A Indústria de Papel e Celulose na Índia**. Índia, Brasil: T&A Consulting. Inside India Trade, 2017. 45 p. Disponível em: <<https://investexportbrasil.dpr.gov.br/arquivos/PesquisasMercado/PMRIndiaSetorPapeleiro2017.pdf>>. Acesso em: 28 de dez. de 2019.
- TAKAMATSU, T.; SHIOYA, S.; TSUJIMOTO, Y. Optimal inter-regional distribution of waste paper and board in the waste paper recycling system. **Resources and Conservation**, Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 95–110, 1982.
- TALAEI, M. et al. A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design problem: A numerical illustration in electronics industry. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 113, p. 662–673, 2016.
- TAMIZ, M.; JONES, D.; EL-DARZI, E. A review of Goal Programming and its applications. **Annals of Operations Research**, New York, v. 58, p. 39–53, 1995.
- TAMIZ, M.; JONES, D.; ROMERO, C. Goal Programming for decision making: An overview of the current state-of-the-art. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 111, n. 3, p. 569–581, 1998.
- TANG, C. S.; ZHOU, S. Research advances in environmentally and socially sustainable operations. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 223, n. 3, p. 585–594, 2012.
- TIRKOLAEI, E. B. et al. A robust bi-objective mathematical model for disaster rescue units allocation and scheduling with learning effect. **Computers and Industrial Engineering**, Oxford, v. 149, 2020.
- TOSARKANI, B. M.; AMIN, S. H. A possibilistic solution to configure a battery closed-loop supply chain: Multi-objective approach. **Expert Systems with Applications**, Oxford, v. 92, p. 12–26, 2018.
- TOSARKANI, B. M.; AMIN, S. H. An environmental optimization model to configure a hybrid forward and reverse supply chain network under uncertainty. **Computers and Chemical Engineering**, Shannon, v. 121, p. 540–555, 2019.
- TOSO, E. A. V.; ALEM, D. Effective location models for sorting recyclables in public management. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 234, n. 3, p. 839–860, 2014.
- TOTH, P.; VIGO, D. **The Vehicle Routing Problem**. Philadelphia, PA: SIAM - Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002.
- TSENG, S.-H. et al. Optimal green supply-chain model design considering full truckload. **Kybernetes**, Bingley, v. 48, n. 9, p. 2150–2174, 2019.
- UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT (UNCTADStat). **Development status groups and composition**. Switzerland: United Nations - UNCTAD, 2018. 9 p. Disponível em: <https://unctadstat.unctad.org/EN/Classifications/DimCountries_DevelopmentStatus_Hierarchy.pdf>. Acesso em: 26 de jan. de 2019.

- VAHDANI, B. An optimization model for multi-objective closed-loop supply chain network under uncertainty: A hybrid fuzzy-stochastic programming method. **Iranian Journal of Fuzzy Systems**, Zahedan, v. 12, n. 4, p. 33–57, 2015.
- VAHDANI, B.; MOHAMMADI, M. A bi-objective interval-stochastic robust optimization model for designing closed loop supply chain network with multi-priority queuing system. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 170, p. 67–87, 2015.
- VAHDANI, B. et al. Reliable design of a closed loop supply chain network under uncertainty: An interval fuzzy possibilistic chance-constrained model. **Engineering Optimization**, Abingdon, Oxfordshire, v. 45, n. 6, p. 745–765, 2013.
- VAHDANI, B. et al. Reliable design of a forward/reverse logistics network under uncertainty: A robust-M/M/c queuing model. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, Oxford, v. 48, n. 6, p. 1152–1168, 2012.
- VAN BEUKERING, P. J. H.; BOUMAN, M. N. Empirical Evidence on Recycling and Trade of Paper and Lead in Developed and Developing Countries. **World Development**, Oxford, v. 29, n. 10, p. 1717–1737, 2001.
- VAN BEUKERING, P. J. H.; SCHOON, E.; MANI, A. **The Informal Sector and Waste Paper Recovery in Bombay**. London, UK; Amsterdam, Netherlands: International Institute for Environment and Development, London, Institute for Environmental Studies, Amsterdam, 1996. (CREED Working Paper). Disponível em: <<https://pubs.iied.org/pdfs/8124IIED.pdf>>. Acesso em: 12 de abr. de 2018.
- VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, Budapest, v. 84, p. 523–538, 2010.
- VAN ENGELAND, J. et al. Literature review: Strategic network optimization models in waste reverse supply chains. **Omega**, Oxford, v. 91, p. 1–22, 2020.
- VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2007.
- VILLANUEVA, A.; WENZEL, H. Paper waste – Recycling, incineration or landfilling? A review of existing life cycle assessments. **Waste Management**, Oxford, v. 27, n. 8, p. S29–S46, 2007.
- WANG, C.-H.; Even Jr, J. C.; ADAMS, S. K. A mixed-integer linear model for optimal processing and transport of secondary materials. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 15, n. 1, p. 65–78, 1995.
- WEB OF SCIENCE. **Web of Science database**. Clarivate Analytics, 2019. Disponível em: <www.webofknowledge.com>. Acesso em: 30 de set. de 2019.
- WORLD BANK. **Population 2017**. United States: World Bank, 2017. 1–4 p. (World Development Indicators database). Disponível em: <<http://databank.worldbank.org/data/download/POP.pdf>>. Acesso em: 12 de abr. de 2018.
- XU, Z. et al. Global reverse supply chain design for solid waste recycling under uncertainties and carbon emission constraint. **Waste Management**, Oxford, v. 64, p. 358–370, 2017.
- YADOLLAHINIA, M.; TEIMOURY, E.; PAYDAR, M. M. Tire forward and reverse supply chain design considering customer relationship management. **Resources Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 138, p. 215–228, 2018.

YAGHIN, R. G.; DARVISHI, F. Order allocation and procurement transport planning in apparel supply chain : A utility-based possibilistic-flexible programming approach. **Fuzzy Sets and Systems**, Amsterdam, v. 398, p. 1–33, 2020.

YOUSEFI-BABADI, A. et al. Designing a Reliable Multi-Objective Queuing Model of a Petrochemical Supply Chain Network under Uncertainty: A Case Study. **Computers and Chemical Engineering**, Shannon, v. 100, p. 177–197, 2017.

YOUSEFI, H. et al. Solving a bi-objective vehicle routing problem under uncertainty by a revised multi-choice goal programming approach. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, North Vancouver, v. 8, p. 283–302, 2017.

YU, H.; SOLVANG, W. D. A general reverse logistics network design model for product reuse and recycling with environmental considerations. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 87, p. 2693–2711, 2016.

ZARANDI, M. H. F.; SISAKHT, A. H.; DAVARI, S. Design of a closed-loop supply chain (CLSC) model using an interactive fuzzy goal programming. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 56, p. 809–821, 2011.

ZARBAKSHNIA, N. et al. A novel hybrid multiple attribute decision-making approach for outsourcing sustainable reverse logistics. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 242, 2020.

ZEBALLOS, L. J.; MENDEZ, C. A.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. Design and Planning of Closed-Loop Supply Chains: A Risk-Averse Multistage Stochastic Approach. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, DC, v. 55, n. 21, p. 6236–6249, 2016.

ZHALECHIAN, M.; TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R.; RAHIMI, Y. A self-adaptive evolutionary algorithm for a fuzzy multi-objective hub location problem: An integration of responsiveness and social responsibility. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, Oxford, v. 62, p. 1–16, 2017.

ZHOU, X. A random multi-objective model on integrated logistics. **World Journal of Modelling and Simulation**, Edgbaston, v. 11, n. 4, p. 243–255, 2015.

ZHOU, X.; XU, J. A class of integrated logistics network model under random fuzzy environment and its application to chinese beer company. **International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems**, Singapore, v. 17, n. 6, p. 807–831, 2009.

ZHOU, X.; ZHOU, Y. Designing a multi-echelon reverse logistics operation and network: A case study of office paper in Beijing. **Resources Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 100, p. 58–69, 2015.

APÊNDICE A – REVISÃO DE LITERATURA - MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO PARA O GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Em se tratando das preocupações relatadas no Capítulo 1, gerenciar sistemas de LR de forma eficiente é importante para o desenvolvimento sustentável dos processos. Portanto, recentes pesquisas envolvendo a otimização de sistemas de LR com foco na sustentabilidade podem ser encontradas na literatura (CHEN et al., 2017; SOLEIMANI et al., 2017; YU; SOLVANG, 2016). Além disso, como situações reais envolvendo logística reversa frequentemente incluem ambientes incertos, para tornar a modelagem mais realista, há também estudos que consideram a incerteza em suas abordagens e usam diferentes técnicas para lidar com esta incerteza (KARA; ONUT, 2010a; KARA; ONUT, 2010b; ÖZKIR; BAŞLIGIL, 2013).

Portanto, com o objetivo de sintetizar o estado da arte dos conhecimentos envolvendo métodos quantitativos aplicados a problemas de gerenciamento de resíduos sólidos, uma revisão de literatura conduzida por meio de uma busca eletrônica nas bases de dados Scopus (SCOPUS, 2019) e Web of Science (WEB OF SCIENCE, 2019), considerando artigos publicados até 30 de setembro de 2019, será apresentada nas próximas seções deste capítulo. O método de pesquisa foi dividido em dois estágios, como resumido no Quadro 19 e foi baseado em palavras-chave e métodos encontrados em artigos de revisão como, por exemplo, Govindan, Fattahi e Keyvanshokoh (2017), Govindan, Soleimani e Kannan (2015), Govindan e Soleimani (2017), Kazemi, Modak e Govindan (2019). O primeiro estágio resume o processo de pesquisa envolvendo otimização, gerenciamento de resíduos sólidos e LR e apresenta os termos usados na busca, onde foram encontrados 603 artigos diferentes em ambas as bases. Neste processo, uma revisão narrativa foi realizada, a evolução das publicações foi investigada (Figura 47) e a coocorrência das palavras-chave foi analisada (Figura 48 e Figura 49). Por meio desta pesquisa, verificou-se a relevância deste estudo e os próximos passos foram organizados.

O segundo estágio foi construído com base em um estudo sobre artigos envolvendo LR, otimização e incerteza. Uma revisão de literatura narrativa e uma pesquisa envolvendo artigos de revisão relacionados ao tópico estudado foram apresentados e uma busca foi conduzida considerando as palavras-chave e os operadores apresentados no Quadro 19. 182 artigos foram encontrados em ambas as bases e a evolução das publicações está ilustrada na Figura 50. Além disso, algumas sugestões para pesquisas futuras foram verificadas e estão no Quadro 21.

Quadro 19 – Método de Pesquisa - otimização e gerenciamento de resíduos sólidos

Estágios	Etapas da pesquisa
<p>Estágio 1: Otimização, Gerenciamento de resíduos e Logística reversa</p> <p>Palavras-chave: <i>“optimization” or “optimisation” and “recycling” or “recycle” or “recycled” or “recyclable” or “recovery” or “remanufacturing” or “disposal” and “reverse logistics” or “reverse supply chain” or “closed – loop supply chain”</i></p>	<p>I) Revisão narrativa da literatura</p> <p>II) Evolução das publicações</p> <p>III) Análise de coocorrência das palavras-chave</p>
<p>Estágio 2: Logística reversa, Otimização Multiobjetivo e Incerteza</p> <p>Palavras-chave: <i>“reverse logistics” or “reverse supply chain” or “closed – loop supply chain” and “multi-objective” or “multiobjective” or “bi-objective” or “goal programming” and “uncertain” or “uncertainty” or “risk” or “stochastic” or “robust” or “fuzzy” or “resilient” or “reliable”</i></p>	<p>I) Revisão narrativa da literatura incluindo artigos de revisão relacionados ao tema pesquisado</p> <p>II) Evolução das publicações e análise de alguns artigos relacionados ao tema em estudo</p> <p>III) Descrição das sugestões de pesquisas futuras encontradas em alguns artigos.</p>

Fonte: elaborado pelo autor com base em Govindan, Fattahi e Keyvanshokoo (2017), Govindan, Soleimani e Kannan (2015), Govindan e Soleimani (2017), Kazemi, Modak e Govindan (2019)

A.1 ESTÁGIO 1: OTIMIZAÇÃO, GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS E LOGÍSTICA REVERSA

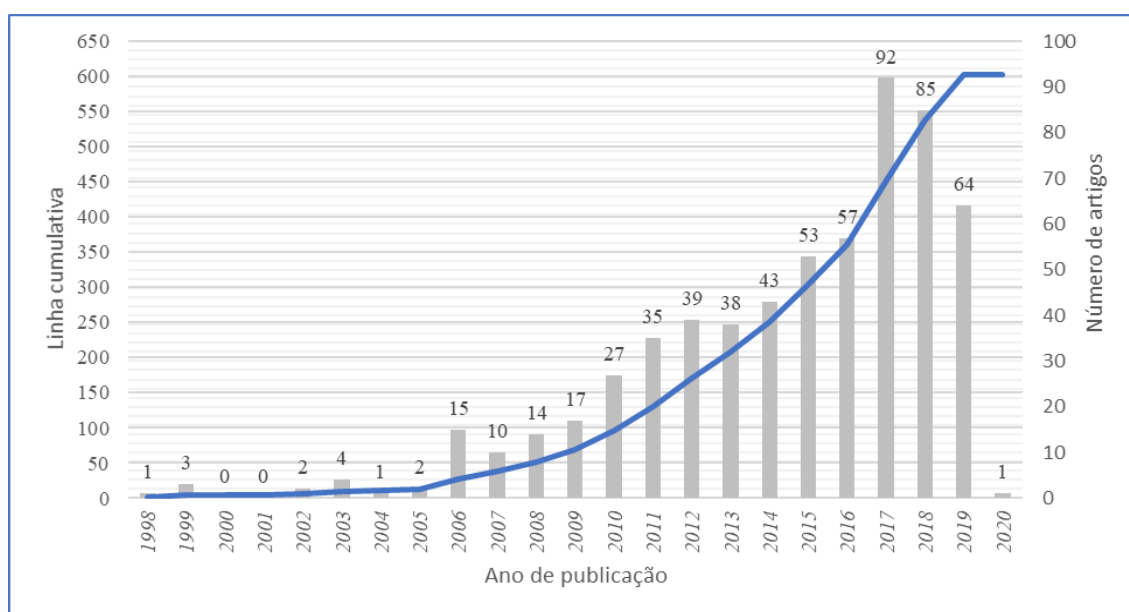
Há muitos estudos na literatura relacionados a processos envolvendo distribuição, planejamento e reciclagem de resíduos sólidos em uma rede de LR. Caruso, Colorni e Paruccini (1993) desenvolveram um modelo matemático considerando alocação e localização para auxiliar o planejamento de um sistema de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos. Barros, Dekker e Scholten (1998) apresentaram um modelo para um problema de gerenciamento e localização dois níveis para lidar com a reciclagem de areia. Em Salema, Barbosa-Póvoa e Novais (2007) foi apresentada uma extensão para o modelo genérico proposto por Fleischmann et al. (2001) para o *design* de redes de LR. A nova formulação permite uma aplicação mais simplificada aos problemas reais e contempla aspectos de distribuição e planejamento para a disposição de resíduos. Sheriff et al. (2017) desenvolveram um modelo que integra decisões relacionadas a localização, alocação e roteamento de diferentes variedades de plásticos reciclados.

Portanto, muito se tem discutido sobre a LR como uma importante questão dentro do contexto de gerenciamento, correta disposição, reciclagem de resíduos e otimização de processos. Dessa forma, para mostrar a crescente integração desses fatores como foco de trabalhos encontrados na literatura, uma pesquisa nas bases de dados Scopus (SCOPUS, 2019) e Web of Science (WEB OF SCIENCE,

2019), considerando o título do artigo, o resumo e as palavras-chave, e apenas artigos publicados em periódicos, foi feita com os seguintes termos: “*optimization*” or “*optimisation*” and (“*recycling*” or “*recycle*” or “*recycled*” or “*recyclable*” or “*recovery*” or “*remanufacturing*” or “*disposal*” and “*reverse logistics*” or “*reverse supply chain*” or “*closed – loop supply chain*”).

Foram encontrados 603 diferentes artigos publicados em periódicos em ambas as bases. A Figura 47 ilustra a evolução das publicações por um diagrama de colunas e um diagrama de linha cumulativa.

Figura 47 – Estágio 1: evolução das publicações

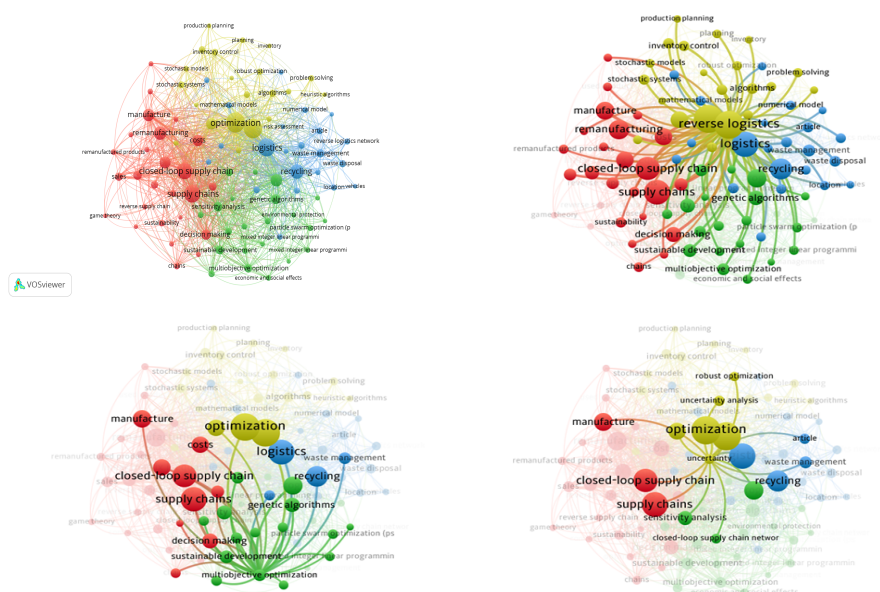


Fonte: informações obtidas das bases de dados Scopus (SCOPUS, 2019) e Web of Science (WEB OF SCIENCE, 2019)

Pode-se observar que a maioria dos artigos, aproximadamente 59%, foi publicada a partir de 2015. A coocorrência de palavras-chave dos artigos obtidos a partir das bases dados utilizadas na pesquisa, usando os termos e estratégias de refinamento descritos acima, foi verificada e está ilustrada nas Figuras 48 e 49. Para esta análise, os mapas de coocorrência foram construídos usando VOSviewer (VAN ECK; WALTMAN, 2010) e foi considerada a contagem completa de todas as palavras-chave disponíveis com um número mínimo de 10 ocorrências.

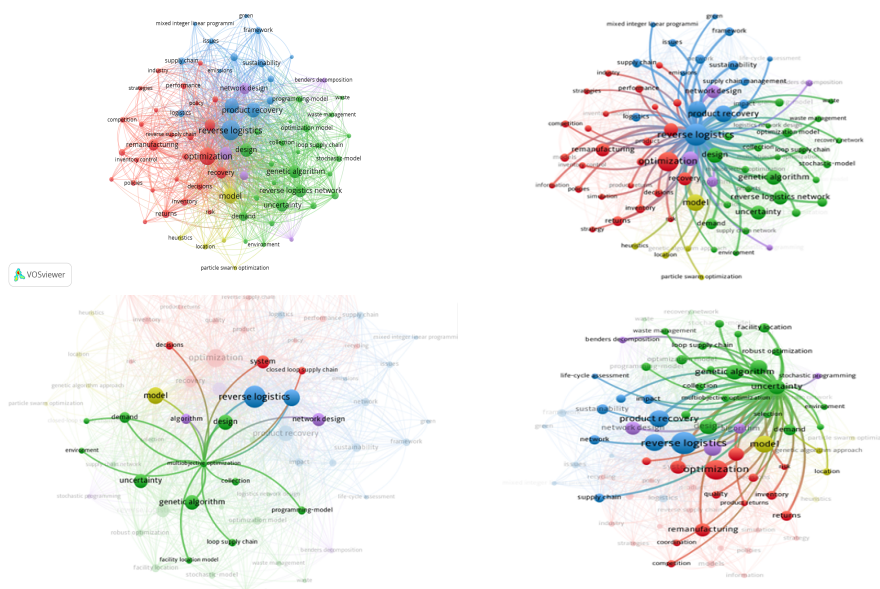
Esta análise mostra associações entre expressões como "logística reversa" ou "*closed-loop supply chain*", "otimização", "multiobjetivo" e "incerteza". Entretanto, poucas associações podem ser observadas entre termos mais específicos como: "multiobjetivo" e "programação estocástica" ou "programação *fuzzy*"; "multiobjetivo" e "sustentabilidade"; "logística reversa" ou "cadeia de suprimentos reversa", "multiobjetivo" e termos relacionados à análise de incerteza (programação estocástica, robusta e *fuzzy*, por exemplo), o que pode indicar a existência de poucos artigos cobrindo alguns destes aspectos.

Figura 48 – Análise de cocorrência de palavras-chave de publicações encontradas na base de dados Scopus: associação geral entre os nós; nó "logística reversa"; nó "multiobjetivo"; nó "incerteza"



Fonte: informações obtidas da base de dados Scopus (SCOPUS, 2019) e mapas elaborados por meio do software VOSviewer (VAN ECK; WALTMAN, 2010).

Figura 49 – Análise de cocorrência de palavras-chave de publicações encontradas na base de dados Web of Science (WEB OF SCIENCE, 2019): associação geral entre os nós; nó "logística reversa"; nó "multiobjetivo"; nó "incerteza"



Fonte: informações obtidas da base de dados Web of Science (WEB OF SCIENCE, 2019) e mapas elaborados por meio do software VOSviewer (VAN ECK; WALTMAN, 2010).

A.2 ESTÁGIO 2: LR, OTIMIZAÇÃO E INCERTEZA

Na literatura, encontra-se estudos cujo modelo é formulado para uma cadeia de suprimentos direta (FARROKHI-ASL et al., 2017) ou para uma cadeia reversa (HAHLER; FLEISCHMANN, 2017). Há, ainda, estudos que apresentam modelos para as duas direções da cadeia, direta e reversa. Neste caso, quando a modelagem captura as duas direções de forma simultânea, é chamada de cadeia de suprimento *closed-loop* ou de ciclo fechado. Segundo Rajeev et al. (2017), aproximadamente 75% dos estudos envolvendo programação linear inteira mista e modelos não-lineares estão relacionados à logística reversa ou à cadeia de suprimentos *closed-loop*.

Muitos modelos de otimização possuem um único objetivo (mono-objetivos), como em John, Sridharan e Kumar (2017), que considera apenas a maximização do lucro. Outros estudos apresentam modelos com mais de um objetivo (bi-objetivo ou multiobjetivo), buscando, por-exemplo, otimizar além de fatores econômicos (como minimização de custos ou maximização de lucro), fatores ambientais (como minimização de emissões de carbono) e sociais (como, por exemplo, minimização de perdas de dias de trabalho ou maximização de responsabilidade para atendimento às demandas dos clientes) (SOLEIMANI et al., 2017; YU; SOLVANG, 2016).

Algumas aplicações encontradas durante a pesquisa, envolvem, por exemplo, a otimização de processos em uma indústria de vidros (GOVINDAN; FATTAHI, 2017) ou envolvendo a cadeia de suprimentos de biodiesel (BABAZADEH et al., 2017). Observa-se, ainda, muitos estudos endereçados a processos envolvendo gerenciamento de resíduos sólidos, como planejamento e reciclagem (ALWAEELI, 2011; ROGHANIAN; PAZHOHESHFAR, 2014; SALEMA; POVOA; NOVAIS, 2006; SHERIFF et al., 2017; TOSO; ALEM, 2014). Em particular, o desenvolvimento sustentável tem recebido crescente atenção, focando em processos de otimização. Como um resultado, muitos estudos envolvem a modelagem quantitativa e questões de sustentabilidade (FEITÓ-CESPÓN et al., 2017; GOVINDAN; JHA; GARG, 2016; ZHALECHIAN; TAVAKKOLI-MOGHADDAM; RAHIMI, 2017).

Neste sentido, para guiar a pesquisa que será apresentada nos próximos capítulos, o Quadro 20 apresenta alguns artigos de revisão que relacionam otimização e questões de sustentabilidade e algumas considerações envolvendo métodos quantitativos, LR e sugestões de pesquisas futuras relacionadas à incerteza, questões sustentáveis e abordagens de solução.

Quadro 20 – Artigos de revisão envolvendo otimização e questões de sustentabilidade

Fonte	Questões estudadas	Algumas sugestões para pesquisas futuras
Akçali, Çetinkaya e Üster (2009)	Características de modelos e abordagens de solução para sistemas de cadeias de suprimentos reversa e closed-loop	Incluir incerteza e parâmetros ambientais e desenvolver novas abordagens de solução.
Agrawal, Singh e Murtaza (2015)	Adoção e implementação de decisões, previsão de retorno de produtos, terciarização, redes de LR do mercado secundário e decisões de disposição	Incluir incerteza, considerar modelos multiobjetivos e desenvolver novas abordagens de solução.
Barbosa-Póvoa, Silva e Carvalho (2018)	O uso de métodos e técnicas de pesquisa operacional para auxiliar o desenvolvimento de cadeias de suprimento sustentável. Pilares da sustentabilidade, incerteza, abordagens de solução, níveis de decisão, aplicações a setores industriais	Desenvolver modelos que integram múltiplos níveis de decisão; mais estudos envolvendo pilares da sustentabilidade; incluir incerteza; combinar e desenvolver novas abordagens de solução; expandir as aplicações industriais.
Dekker, Bloemhof e Mallidis (2012)	Aspectos ambientais das cadeias de suprimentos para transporte, produtos e armazenamento, e instalações com foco em design, planejamento e controle das operações. Considerações de modelos quantitativos envolvendo os aspectos estudados e medidas ambientais também são destacadas	Incluir parâmetros ambientais e considerar modelos multiobjetivos.
Van Engeland et al. (2020)	Modelos matemáticos de otimização para o planejamento de redes de cadeia de suprimentos reversa. Aspectos de sustentabilidade, aplicações em regiões geográficas, incerteza, economia circular e métodos de solução.	Incluir aspectos ambientais e sociais. Considerar modelos multiobjetivos e multiiníveis com objetivos de diferentes "stakeholders"; desenvolver novas abordagens de solução e o uso de incerteza.
Fleischmann et al. (1997)	Modelos quantitativos para o fluxo reverso com foco em distribuição, planejamento da produção, controle de armazenamento e design da rede.	Incluir incerteza.
Govindan e Soleimani (2017)	Características dos artigos online aceitos pelo Journal of Cleaner Production, considerando assuntos relacionados a cadeias de suprimento closed-loop e logística reversa (como gerenciamento de resíduos e reciclagem) e os métodos de pesquisa abordados nos artigos selecionados.	Incluir incerteza, considerar modelos multiobjetivos e desenvolver novas abordagens de solução.
Govindan, Soleimani e Kannan (2015)	Características das cadeias de suprimentos closed-loop e problemas de logística reversa com categorias incluindo: campo de pesquisa (logística reversa, cadeia de suprimentos closed-loop, sustentável, questões verdes), tipo de problema, o uso de incerteza, abordagens de modelagem, métodos de solução, estudos de caso, nível das variáveis de decisão, períodos considerados para modelagem, número de produtos, e número de funções-objetivo.	Incluir incerteza e parâmetros ambientais, considerar modelos multiobjetivos e desenvolver novas abordagens de solução.
Govindan, Fattahi e Keyvanshokoh (2017)	Redes de cadeia de suprimentos (direta e reversa), aspectos de otimização e ambientes envolvendo incerteza	Incluir incerteza e parâmetros ambientais, considerar modelos multiobjetivos e desenvolver novas abordagens de solução.
Ilgın e Gupta (2010)	Aspectos ambientais e ferramentas para design de produtos, características de cadeias de suprimentos reversa e closed-loop, como design da rede e otimização de transporte, remanufatura e desmontagem.	Incluir incerteza e parâmetros ambientais e desenvolver novas abordagens de solução.
Jaehn e Juopperi (2019)	Problemas de gerenciamento da cadeia de suprimentos em indústria de papel. Produção, distribuição, estoque, análise de fibras recicladas, processos de otimização e incerteza.	Qualidade e disponibilidade de fibras recicladas, planejamento de processos considerando incerteza de demanda, modelos de otimização que incorporam variações de preço de energia.
Kazemi, Modak e Govindan (2019)	Características dos artigos publicados no International Journal of Production Research de 2000 a julho de 2017, envolvendo logística reversa e gerenciamento da cadeia de suprimentos closed-loop (evolução das publicações, autores, afiliações, número de citações). Categorias utilizadas: modelos matemáticos (gerenciamento de armazenagem e do retorno de produtos, design de redes, sistemas dinâmicos, coordenação da cadeia de suprimentos e outros) e modelos não-matemáticos. Além disso, foram analisados os métodos de solução, o uso de incerteza e as aplicações.	Mais considerações envolvendo aspectos de sustentabilidade e utilização de outras abordagens envolvendo incerteza.
Lyeme, Mushi e Nkansah-Gyekye (2017b)	Modelos de otimização aplicados a sistemas de gerenciamento de resíduos. Características analisadas: critérios de otimização, aspectos ambientais, parâmetros e restrições considerados nos modelos, métodos, técnicas e resultados.	Incluir parâmetros ambientais, considerar modelos multiobjetivos e desenvolver novas abordagens de solução.
Melo, Nickel e Saldanha-da-Gama (2009)	O artigo foca em modelos de localização de instalações e aspectos relacionados ao planejamento estratégico da cadeia de suprimentos, à estrutura da rede da cadeia de suprimentos, medidas de desempenho, técnicas de otimização e aplicações.	Incluir incerteza, considerar modelos multiobjetivos e desenvolver novas abordagens de solução.
Rajeev et al. (2017)	Análise de pesquisas envolvendo os três pilares da sustentabilidade publicados nos principais periódicos (tendências, periódicos que focam nestas questões, estudos específicos de indústrias, tipos de metodologias usadas, estudos quantitativos, entre outros)	Incluir parâmetros ambientais e desenvolver novas abordagens de solução.
Singh e Trivedi (2016)	Gerenciamento da cadeia de suprimentos sustentável verde incluindo categorias do tipo: cadeia de suprimentos verde e literatura relacionada a sustentabilidade ambiental, métodos e os setores/indústrias considerados nos artigos. Grupos para condução da pesquisa, conforme método utilizado no artigo: "conceitual, analítico, empírico e pesquisa aplicada". Em estudos analíticos, por exemplo, o uso de modelos matemáticos, métodos e heurísticos e simulação foi verificado.	Incluir parâmetros ambientais, considerar modelos multiobjetivos e desenvolver novas abordagens de solução.
Stindt e Sahamie (2014)	O artigo foca em abordagens quantitativas aplicadas às cadeias de suprimentos em processos industriais e análises envolvendo localização de instalações, previsão, dimensionamento de lotes, design de redes, gerenciamento de retorno de produtos, planejamento da produção, sequenciamento e programação da produção e estudos de caso.	Incluir incerteza e parâmetros ambientais, considerar modelos multiobjetivos e desenvolver novas abordagens de solução.
Tang e Zhou (2012)	Este artigo analisa interações dos fluxos de diferentes instituições que afetam medidas de fatores ambientais e sociais nas operações, focando em modelos quantitativos para endereçar estas questões.	Incluir parâmetros ambientais e considerar modelos multiobjetivos.

Fonte: preparado pelo autor. Artigos podem ser encontrados nas bases de dados Scopus (SCOPUS, 2019) e Web of Science (WEB OF SCIENCE, 2019)

Rajeev et al. (2017) observaram que há poucos estudos que contemplam as três dimensões da sustentabilidade e que, entre os métodos encontrados nos trabalhos mapeados, os mais frequentes envolvem Programação Linear Inteira Mista (PLIM), modelagem não-linear e heurísticas. Govindan e Soleimani (2017) comentaram sobre informações relacionadas à sustentabilidade encontradas nos artigos analisados, mas enfatizaram que estudos devem ser desenvolvidos considerando assuntos similares e abordagens sustentáveis. Govindan, Fattahi e Keyvanshokoo (2017) apresentaram uma análise detalhada da literatura envolvendo etapas dos fluxos de materiais, com foco em incerteza, considerando aspectos de otimização e parâmetros relacionados a sustentabilidade. Os autores enfatizaram que mais pesquisas são necessárias contemplando programação estocástica, programação robusta e programação *fuzzy* em estudos envolvendo incerteza, assim como modelos e estudos sobre técnicas para resolver problemas de grande escala.

Assim, pode-se observar que as sugestões relacionam aspectos de sustentabilidade à modelagem quantitativa, e envolvem a inclusão de parâmetros ambientais, consideração de múltiplos objetivos e estudos que contemplam tecnologias e técnicas que podem ser utilizadas para auxiliar na resolução destes tipos de problemas. Além disso, aproximadamente 77% dos artigos de revisão estudados (Quadro 20) apresentam sugestões envolvendo o uso de abordagens não determinísticas. Portanto, a próxima seção apresentará um estudo considerando este importante tópico dentro da LR: a incerteza.

A.3 OTIMIZAÇÃO SOB INCERTEZA

De acordo com Gooran, Rafiei e Rabani (2018), em problemas envolvendo redes de LR há um alto grau de incerteza em parâmetros como qualidade, preço, tempo e quantidade de produtos retornados. Estas incertezas impõem um alto grau de complexidade em redes de LR (BABAZADEH; JOLAI; RAZMI, 2015). Para lidar com a incerteza nestes problemas, métodos de solução envolvendo programação estocástica, otimização robusta ou programação *fuzzy* têm sido encontrados na literatura (PISHVAEE; RABBANI; TORABI, 2011; HOSSEINZADEH; ROGHANIAN, 2012; GOVINDAN; PAAM; ABTAHI, 2016). Há ainda estudos que combinam algumas abordagens (VAHDANI et al., 2012; VAHDANI et al., 2013; MEHRBOD; TU; MIAO, 2015; TOSARKANI; AMIN, 2019).

Portanto, dando continuidade à pesquisa apresentada, conforme apresentado na Figura 19, uma pesquisa nas bases de dados Scopus (SCOPUS, 2019) e Web of Science (WEB OF SCIENCE, 2019), considerando o título do artigo, o resumo e as palavras-chave, e apenas artigos publicados em periódicos, foi feita usando os seguintes termos e expressões: “*multi-objective*” or “*multiobjective*” or “*bi-objective*” or “*goal programming*” and (“*reverse logistics*” or “*reverse supply chain*” or “*closed – loop supply chain*”) and (“*uncertain*” or “*uncertainty*” or “*risk*” or “*stochastic*” or “*robust*” or “*fuzzy*” or “*resilient*” or “*reliable*”). 182 diferentes artigos foram encontrados em ambas as bases utilizadas na pesquisa e a evolução das publicações está ilustrada na Figura 50.

Figura 50 – Estágio 2: evolução das publicações



Fonte: informações obtidas das bases de dados Scopus (SCOPUS, 2019) e Web of Science (WEB OF SCIENCE, 2019)

Rajeev et al. (2017) sugeriram pesquisas na direção do gerenciamento da cadeia de suprimentos sustentável, com aplicações a indústria e sob uma perspectiva envolvendo os pilares da sustentabilidade. Reforçando estas sugestões, Govindan, Fattahi e Keyvanshokoo (2017) identificaram em problemas sob incerteza a necessidade de mais estudos apresentando modelos com aplicações reais.

Neste sentido, observou-se, em alguns artigos encontrados nesta pesquisa, aplicações reais e estudos de caso envolvendo, por exemplo, a cadeia de suprimentos de biodiesel (BABAZADEH et al., 2017), gerenciamento de resíduos plásticos (SHERIFF et al., 2017), gerenciamento de resíduos sólidos de forma geral (TOSO; ALEM, 2014; AMIN; BAKI, 2017), gerenciamento de resíduos de computador (AHLUWALIA; NEMA, 2006), reciclagem de plástico (FEITÓ-CESPÓN et al., 2017), reciclagem de seringas médicas (GOVINDAN; PAAM; ABTAHI, 2016), indústria de impressoras/copiadoras (GOVINDAN et al., 2017; TALAEI et al., 2016), indústria de cerveja (KANG; WANG; MA, 2017; ZHOU, 2015; ZHOU; XU, 2009), recuperação de peças de computador (KUSUMASTUTI; PIPLANI; LIM, 2009), refinaria de óleo (PAYDAR; BABAVEISI; SAFAEI, 2017), indústria automotiva (GOVINDAN et al., 2020; ZARBAKSHSHNIA et al., 2020), indústria de baterias (SUBULAN et al., 2015; SUBULAN; TASAN; BAYKASOGLU, 2015a; TOSARKANI; AMIN, 2018; TOSARKANI; AMIN, 2019), indústria siderúrgica (VAHDANI, 2015; VAHDANI; MOHAMMADI, 2015; VAHDANI et al., 2012; VAHDANI et al., 2013), rede petroquímica (YOUSEFI-BABADI et al., 2017), entre outros.

O Quadro 21 apresenta algumas sugestões de pesquisas futuras propostas por alguns artigos encontrados na busca. Tais sugestões envolvem: inclusão de heurísticas e/ou metaheurísticas (H/MH); inclusão ou alteração de aspectos ambientais (A) e/ou sociais (S) considerados nos objetivos; inclusão ou alteração de parâmetros aleatórios; uso de outras abordagens para lidar com incerteza; uso de mais de uma abordagem para lidar com incerteza; inclusão de aplicações reais; aplicação a outras situações reais.

Dos 33 artigos analisados, 17 sugeriram a inclusão de outros métodos de solução como métodos heurísticos (ou metaheurísticos), 3 propuseram a inclusão de questões ambientais e 6 de questões sociais. Somente 1 trabalho sugeriu a inclusão de ambos os aspectos. 2 artigos sugeriram alterar os

aspectos ambientais considerados e apenas 1 propôs alterar os aspectos sociais. Em relação à incerteza, 11 artigos sugeriram alterar os parâmetros aleatórios considerados ou incluir outros parâmetros. 8 artigos sugeriram usar outras abordagens para lidar com a incerteza e 7 indicaram o aprimoramento ou o uso de mais de uma técnica para lidar com a incerteza. As sugestões que envolvem incluir aplicações reais e aplicações a outras situações reais podem ser encontradas em 6 e 3 artigos, respectivamente.

Quadro 21 – Algumas sugestões para pesquisas futuras encontradas em artigos revisados

Fonte	H/MH	Inclusão de aspectos sustentáveis		Alteração de aspectos sustentáveis	Inclusão ou alteração de parâmetros aleatórios	Uso de outras abordagens para lidar com incerteza	Uso de mais de uma abordagem para lidar com incerteza	Inclusão de aplicações reais	Aplicações a outros casos reais
		A	S						
Altman e Bogaschewsky (2014)				A				✓	
Ameknassi, Ait-Kadi e Rezg (2016)			✓	✓					
Amin e Baki (2017)	✓								
Amin e Zhang (2013a)	✓							✓	
Amin e Zhang (2013b)					✓			✓	
Amalnick e Safar (2017)	✓		✓						
Dai (2016)	✓						✓		
Dai e Dai (2016)	✓		✓		✓				
Dai e Li (2017)	✓						✓		
Demirel et al. (2014)					✓				✓
Feitó-Cespón et al. (2017)				✓					
Govindan, Paam e Abrabi (2016)					✓				✓
Govindan et al. (2017)							✓		✓
Govindan et al. (2020)	✓		✓						
MA et al. (2016)	✓								
Mehroob et al. (2012)					✓				
Mehroob, Tu e Miao (2015)					✓			✓	
Özceylan e Paksoy (2013)	✓								
Özceylan e Paksoy (2014)	✓							✓	
Özkar e Başlıgil (2013)		✓	✓						
Paksoy, Pehlivan e Özceylan (2012)	✓				✓				
Paydar, Babaveisi e Safaei (2017)	✓								
Pishvaei e Torabi (2010)	✓						✓		
Ramezani et al. (2014)									
Soleimani et al. (2017)			✓	✓					
Subulan, Tasan e Baykasoglu (2015a)	✓				✓				✓
Subulan, Tasan e Baykasoglu (2015a)	✓				✓				
Talaei et al. (2016)			✓				✓		
Tosarkani e Amin (2018)					✓				
Tosarkani e Amin (2019)							✓		
Yousefi-Babadi et al. (2017)	✓								
Zarbakhshnia et al. (2020)									
Zeballos, Mendez e Barbosa-Póvoa (2016)	✓						✓		

Fonte: preparado pelo autor. Artigos podem ser encontrados nas bases de dados Scopus (SCOPUS, 2019) e Web of Science (WEB OF SCIENCE, 2019).

Alguns exemplos de aplicação apresentados neste capítulo envolvem o gerenciamento e reciclagem de resíduos sólidos, de uma forma geral, ou seguindo um caminho mais específico, a reciclagem de resíduos plásticos, por exemplo.

Destaca-se que Van Engeland et al. (2020) e Barbosa-Póvoa, Silva e Carvalho (2018) apresentaram estudos envolvendo o fluxo reverso, modelos matemáticos e aspectos da sustentabilidade com foco em processos das cadeias de suprimento de uma forma geral, conforme descrito no Quadro 20. Vale ressaltar, assim, oportunidades envolvendo estudos sobre processos que são parte de um sistema específico, já que as condições e etapas em um processo reverso podem variar de acordo com o tipo de material estudado (RUTKOWSKI; RUTKOWSKI, 2017). Um outro exemplo de aplicação que também pode ser encontrado na literatura envolve a logística de reciclagem de resíduos de papel. Neste sentido, embora Jaehn e Juopperi (2019) tenham apresentado uma revisão envolvendo problemas em gerenciamento da cadeia suprimento de papel, cadeias de suprimentos reversas não foram o foco deste estudo.

APÊNDICE B – REVISÃO DE LITERATURA - MODELOS DE PROGRAMAÇÃO POR METAS

A representação de problemas reais por meio de modelos matemáticos é uma tarefa que exige alta capacidade de interpretação e análise do compromisso (*trade-off*) que acontecem nos sistemas reais, além de alto nível de conhecimento para a representação dos sistemas utilizando a linguagem matemática (GOLDBARG; LUNA, 2005; ARENALES et al., 2006).

Neste sentido, modelos multiobjetivos apresentam maior flexibilidade em relação a situações reais do que os modelos mono-objetivos, cuja única função objetivo pode deixar a representação real mais rígida (COLLETTE; SIARRY, 2004). Dessa forma, muitos trabalhos da literatura apresentam modelos cuja função objetivo é formada pela composição de dois ou mais objetivos conflitantes (FEITÓ-CESPÓN et al., 2017; PATI; VRAT; KUMAR, 2008a). Exemplos de objetivos conflitantes podem envolver a minimização de custos de produção e de estoque, já que ao minimizar os custos de produção, a solução deverá minimizar os custos de preparação das máquinas, elevando os níveis de estoque. Neste caso, tem-se objetivos conflitantes de mesma grandeza, o que torna aceitável uma formulação que utiliza uma única função (ARENALES et al., 2006).

É comum, entretanto, encontrar formulações que incluem objetivos de diferentes grandezas, como, por exemplo, aquelas envolvendo custos, distância, tempo, quantidade produzida, entre outros. Neste contexto, será obtido um conjunto de soluções, denominadas soluções de Pareto, e uma única solução que representa o compromisso ou "*trade off*" entre os objetivos deverá ser selecionada (COLLETTE; SIARRY, 2004).

Há algumas abordagens para resolver problemas de otimização multiobjetivo que incluem, por exemplo: método da soma ponderada das funções objetivo, método de compromisso, método lexicográfico, métodos híbridos (que combinam abordagens), métodos interativos, métodos de lógica *fuzzy*, métodos de auxílio à decisão, como *Analytic Hierarchy Process* (AHP), *Analytic Network Process* (ANP) e *Technique for the Order of Prioritization by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS), entre outros (GOVINDAN; SOLEIMANI, 2017; COLLETTE; SIARRY, 2004).

A Programação por Metas (ou *Goal Programming* - GP) é uma técnica de tomada de decisão onde são estabelecidos valores a priori para cada função objetivo, denominados metas. O modelo é reformulado considerando restrições denominadas flexíveis que são incorporadas à formulação e cujo objetivo passa a ser a minimização dos desvios em relação às metas (ARENALES et al., 2006; CHARNES; COOPER, 1961; COLAPINTO; JAYARAMAN; MARSIGLIO, 2017). Conforme descrito em Abdelaziz, Aouni e Fayedh (2007), Chang (2007) e Colapinto, Jayaraman e Marsiglio (2017) a formulação original foi proposta por Charnes, Cooper e Ferguson (1955) e Charnes e Cooper (1961) e uma adaptação da formulação apresentada em Chang (2007) foi expressa pelas equações (1) - (2). Revisões sobre o tema podem ser encontradas em Caballero, Gómez e Ruiz (2009), Silva e Marins (2015), Colapinto, Jayaraman e Marsiglio (2017) e Tamiz, Jones e El-Darzi (1995).

$$\text{Min } Z = \sum_{i \in I} |f_i(X) - G_i| \quad (1)$$

Sujeito a:

$$X \in F, \quad F \text{ é um conjunto factível} \quad (2)$$

Fonte: adaptado de Chang (2007)

G_i representam as metas associadas às funções objetivo $f_i(X)$, lineares, X é o vetor das variáveis de decisão que pertencem ao conjunto de soluções viáveis F do problema.

O Quadro 22 exemplifica o método de aplicação da técnica de Programação por Metas. São apresentados os objetivos a serem otimizados, os tipos de metas atribuídas para cada objetivo, as equações que relacionam as metas e os objetivos, depois de incluídas as variáveis de desvio, e os desvios a serem minimizados.

Quadro 22 – Método de aplicação da Programação por Metas

Objetivos	Tipos de metas	Equações que relacionam os objetivos e as metas	Variáveis de desvios a serem minimizadas
$f_1 = \text{Max } Z$	$Z \geq G_1$	$Z + d_1^- \geq G_1$	d_1^-
$f_2 = \text{Min } Z$	$Z \leq G_2$	$Z - d_2^+ \leq G_2$	d_2^+
$f_3 =$ <i>Max ou Min</i> Z	$Z = G_3$	$Z + d_3^- - d_3^+ = G_3$	$d_3^- - d_3^+$

Fonte: adaptado de Rubem, Mello e Meza (2017)

As equações que relacionam os objetivos f_1 , f_2 e f_3 às metas G_1 , G_2 e G_3 são as restrições flexíveis do modelo associadas a cada objetivo, formuladas por meio da utilização de d_1^- , d_2^+ , d_3^- e d_3^+ , variáveis auxiliares que representam os desvios acima ou abaixo de valores obtidos em relação às metas (SILVA; MARINS, 2015).

B.1 MODELOS DETERMINÍSTICOS DE PROGRAMAÇÃO POR METAS

Na literatura, existem vários métodos de Programação por Metas utilizados na resolução de problemas multiobjetivos. Os principais métodos, segundo Romero (2001), Silva e Marins (2015), Chang (2007) e Romero (2004), envolvem:

- A Programação por Metas Ponderada (sigla em inglês WGP), em que pesos são atribuídos às variáveis de desvio relacionadas às metas (ROMERO, 2001; ROMERO, 2004; CHANG, 2007; SILVA; MARINS, 2015).

- A Programação por Metas com Priorização (sigla em inglês LGP), ou Lexicográfico, em que os objetivos são otimizados conforme a ordem de prioridade estabelecida pelos decisores (ROMERO, 2001; ROMERO, 2004; CHANG, 2007; SILVA; MARINS, 2015).
- A Programação por Metas Minmax (sigla em inglês Minmax GP), em que a função objetivo a ser minimizada é o desvio máximo em relação às metas, sendo, desta forma, o limitante superior das somas dos desvios (ROMERO, 2001; ROMERO, 2004; CHANG, 2007; SILVA; MARINS, 2015).

As formulações para esses três métodos foram adaptadas de Chang (2007) e estão descritas a seguir.

Programação por Metas Ponderada (WGP)

$$\text{Min } Z = \sum_{i \in I} (\alpha_i d_i^- + \beta_i d_i^+) \quad (3)$$

Sujeito a:

$$f_i(X) + d_i^- - d_i^+ = G_i, \quad i \in I \quad (4)$$

$$d_i^-, d_i^+ \geq 0, \quad i \in I \quad (5)$$

$$X \in F, \quad F \text{ é um conjunto factível} \quad (6)$$

Fonte: adaptado de Chang (2007)

Programação por Metas Lexicográfico (LGP)

$$\text{Min } Z = \left[\sum_{i \in h_1} (\alpha_i d_i^- + \beta_i d_i^+), \dots, \sum_{i \in h_r} (\alpha_i d_i^- + \beta_i d_i^+), \dots, \sum_{i \in h_Q} (\alpha_i d_i^- + \beta_i d_i^+) \right] \quad (7)$$

Sujeito a:

$$f_i(X) + d_i^- - d_i^+ = G_i, \quad i \in I, \quad i \in h_r, r \in Q \quad (8)$$

$$d_i^-, d_i^+ \geq 0, \quad i \in I \quad (9)$$

$$X \in F, \quad F \text{ é um conjunto factível} \quad (10)$$

Fonte: adaptado de Chang (2007)

Programação por Metas Minmax (Minmax GP)

$$\text{Min } D \quad (11)$$

Sujeito a:

$$D \geq \alpha_i d_i^- + \beta_i d_i^+ \quad (12)$$

$$f_i(X) + d_i^- - d_i^+ = G_i, \quad i \in I, \quad (13)$$

$$d_i^-, d_i^+ \geq 0, \quad i \in I \quad (14)$$

$$X \in F, \quad F \text{ é um conjunto factível} \quad (15)$$

Fonte: adaptado de Chang (2007)

Seja $|I| = 3$ e as equações que relacionam os objetivos e as metas, conforme Quadro 22. No modelo WGP, o objetivo é otimizar a soma ponderada dos desvios em que $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ são os pesos positivos das metas, definidos conforme a importância atribuída pelo decisor. Já no LGP, a otimização acontecerá conforme a prioridade. Se a ordem de importância for $\{\alpha_1 d_1^-, \alpha_3(d_3^- + d_3^+) \text{ e } \alpha_2 d_2^-\}$, então, $Z_1 = \alpha_1 d_1^-$ será minimizado e, depois de obtida uma solução, o valor de d_1^- será fixado entre as restrições. Em seguida, $Z_2 = \alpha_3(d_3^- + d_3^+)$ será minimizado e os valores de d_1^- e $d_3^- + d_3^+$ serão fixados entre as restrições. Por fim, $Z_3 = \alpha_2 d_2^-$ será minimizado e a solução será obtida conforme a ordem de prioridade, resultando nos valores de $d_1^-, d_2^-, \text{ e } d_3^- + d_3^+$. Na Programação por Metas Minmax, uma função de utilidade é otimizada e o desvio máximo em relação a essa função é minimizado (ROMERO, 2004).

Segundo Colapinto, Jayaraman e Marsiglio (2017), a Programação por Metas Ponderada e a Lexicográfica têm sido bastante aplicadas a problemas de gerenciamento e às ciências econômicas e sociais, com destaque para modelos ponderados para problemas de gerenciamento.

Outras formulações para modelos determinísticos de programação por metas, como: a Programação por Metas Estendida, a Programação por Metas Inteira, a Programação por Metas Binária, a Programação por Metas para a Análise por Envoltória de Dados e a Programação por Metas Não-Linear são apresentados em Silva e Marins (2015).

A seção a seguir apresentará uma pequena revisão de artigos que utilizam a abordagem de Programação por Metas em formulações multiobjetivo para a otimização de etapas da cadeia de suprimentos.

B.2 A PROGRAMAÇÃO POR METAS NA LITERATURA

O Quadro 23 apresenta algumas características de trabalhos que utilizam a Programação por Metas como técnica para modelos com mais de um objetivo, incluindo algumas características da formulação que será apresentada no Capítulo 3 desta tese. Os elementos estudados envolvem: uso de heurísticas e/ou metaheurísticas (H/MH); fatores sustentáveis considerados nos objetivos (econômico - E, ambiental - A e/ou social - S); direção da cadeia (direta - D, reversa - R, ou ambas, se do tipo *closed-loop*); uso de abordagens para lidar com incerteza (estocástica - ES, robusta - RO, *fuzzy* - FU, Outras); se mais de um produto é considerado na modelagem; se mais de um período é considerado na

modelagem; se várias etapas são consideradas na modelagem; se o modelo é de Programação Linear (PL), Programação Linear Inteira Mista (PLIM), Programação Não-Linear (PNL) ou Programação Não-Linear Inteira Mista (PNLIM); se apresenta exemplos de aplicação/estudo de caso para uma situação real; e o tipo de modelo de Programação por Metas utilizado.

Quadro 23 – Características encontradas em artigos revisados que usam a abordagem Programação por Metas

Fonte	H/MH	Aspectos sustentáveis				Direção da cadeia			Incerteza			Multiprodutos	Multiperíodos	Multietapas	Abordagem	Aplicação real	Modelos utilizados
		E	A	S	D	R	ES	RO	FU	PL	PI						
Rahmani-Ahramjani et al. (2018)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	PNLIM	Indústria de papel	FGP	
Rahmani-Ahramjani et al. (2017a)		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	PLIM	Indústria de papel	FGP	
Rahmani-Ahramjani et al. (2017b)		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	PLIM	Indústria de papel	Interactive FGP (IFGP)	
Asim, Jalil e Javid (2019)		✓			✓	✓					✓	✓	✓	PNL	Uma empresa que fabrica e transporta produtos de decoração para casa de latão, alumínio, Ferro, madeira, entre outros.	Interactive FGP (IFGP)	
Bal e Satoglu (2018)		✓	✓	✓	✓	✓					✓	✓	✓	PLIM	Sistema de reciclagem de resíduos eletrônicos	LGP	
Bookhroub et al. (2015)		✓	✓	✓	✓	✓					✓	✓	✓	PL	Indústria madeireira	WGP	
Ghorbani, Arabzad e Tavakkoli-Moghaddam (2014)		✓	✓			✓					✓	✓	✓	PI		FGP	
Gupta e Evans (2009)		✓			✓	✓					✓	✓	✓	PL		Weighted FGP (WFGP)	
Lyeme, Mushi e Nkansah-Gyekye (2017a)		✓	✓		✓	✓					✓	✓	✓	PLIM	Gerenciamento de resíduos sólidos de uma cidade na Tanzânia	LGP	
Mehrbod et al. (2012)		✓			✓	✓					✓	✓	✓	PNLIM		Interactive FGP (IFGP)	
Mehrbod, Tu e Miao (2015)		✓			✓	✓					✓	✓	✓	PLIM		Interactive FGP (IFGP)	
Pati, Vrat e Kumar (2008a)		✓	✓			✓					✓	✓	✓	PLIM	Sistema de reciclagem de resíduos de papel	LGP	
Subulian, Tazan e Baykasoglu (2015a)		✓	✓		✓	✓					✓	✓	✓	PLIM	Indústria de bateria de chumbo/ácido	FGP	
Subulian, Tazan e Baykasoglu (2015b)		✓	✓		✓	✓					✓	✓	✓	PLIM	Indústria de pneus	Interactive FGP (IFGP)	
Zarandi, Sisakht e Davari (2011)		✓			✓	✓					✓	✓	✓	PLIM		FGP	
Proposta		✓	✓			✓		*	*	*	✓	✓	✓	PLIM	Sistema de reciclagem de resíduos de papel	WGP, LGP e RMCGP	

* A incerteza será considerada por meio da Programação por Metas *Multi-Choice* Revisada (RMCGP)

Fonte: preparado pelo autor. Artigos podem ser encontrados nas bases de dados Scopus (SCOPUS, 2019) e Web of Science (WEB OF SCIENCE, 2019)

Destaque para os trabalhos de Pati, Vrat e Kumar (2008a), Rahmani-Ahranjani et al. (2018), Rahmani-Ahranjani et al. (2017a) e Rahmani-Ahranjani et al. (2017b) que utilizaram abordagens de Programação por Metas para o sistema de reciclagem de resíduos de papel. Algumas diferenças entre o modelo apresentado neste trabalho e os trabalhos destacados acima, principalmente o modelo proposto em Pati, Vrat e Kumar (2008a), inspiração inicial para a formulação desenvolvida, envolvem: o roteamento de veículos, considerando veículos de diferentes capacidades; o foco nas etapas do processo logístico de um centro intermediário; o modelo multiperíodo; a utilização da Programação por Metas Ponderada e, para lidar com incerteza, da Programação por Metas *Multi-choice* Revisada.

APÊNDICE C – PROGRAMAÇÃO POR METAS MULTIESCOLHA REVISADA

O modelo de Programação por Metas Multiescolha (MCGP) foi proposto por Chang (2007) e considera a possibilidade de vários níveis de aspirações (ou valores de metas). O modelo, diferentemente do modelo de Programação por Metas clássico, auxilia o tomador de decisões ao considerar incerteza nas constantes associadas aos limites dos recursos, ou seja, que ficam do lado direito das restrições (RHS). A modelagem deve ser feita de acordo com a necessidade do decisor: a meta considerada pode ser do tipo “quanto mais melhor” ou “quanto menos melhor” (SILVA; MARINS, 2015; CHANG, 2007; SINGH; SONIA, 2017).

O modelo MCGP envolve ainda a multiplicação de variáveis binárias para a modelagem dos níveis de aspiração, o que não deixa a formulação simples para representar problemas reais. Desta forma, Chang (2008) desenvolveu um modelo de Programação por Metas Multiescolha Revisado (*Revised Multi-choice Goal Programming - RMGP*) em que os valores das metas pertencem a espaços contínuos (SILVA; MARINS, 2015). Uma revisão sobre problemas de Programação por Metas Multiescolha pode ser encontrada em Singh e Sonia (2017). A seguir, estão descritos alguns trabalhos recentes que utilizaram MCGP para resolver problemas associados à cadeia de suprimentos e à logística.

Ho (2019) apresentou dois métodos de auxílio à decisão envolvendo a Programação por Metas Multiescolha Ponderada e a Programação por Metas Multiescolha Minmax. Para mostrar as diferenças entre os dois métodos, o estudo utiliza um problema real envolvendo a seleção de fornecedores de uma companhia de manufatura. Kargar, Pourmehdi e Paydar (2020) desenvolveram um modelo linear de MCGP Revisado para o planejamento de transporte e tratamento de resíduos médicos infecciosos. Yadollahinia, Teimoury e Paydar (2018) apresentaram um modelo de Programação Linear Inteira-Mista Multiobjetivo para a cadeia de suprimentos direta e reversa. O modelo foi resolvido considerando as abordagens de MCGP e otimização robusta.

Tirkolae et al. (2020) propuseram um modelo de Programação Linear Inteira Mista com dois objetivos para um problema de alocação e programação de unidades de resgate em desastres. O modelo foi resolvido por meio das abordagens de MCGP e otimização robusta. Yaghin e Darvishi (2020) apresentaram um modelo de Programação Linear Inteira Mista Multiobjetivo para um problema de alocação de pedidos e planejamento de transporte em uma cadeia de suprimentos de vestuário. O modelo considera o planejamento de aquisição, transporte e seleção de fornecedores. Foram utilizadas abordagens *fuzzy* e de MCGP. Rostami, Paydar e Asadi-gangraj (2020) desenvolveram um modelo multiobjetivo para integrar uma célula de gerenciamento virtual (em inglês *virtual cellular manufacturing* ou VCM) à cadeia de suprimentos considerando o conceito de desenvolvimento de um novo produto. O modelo foi resolvido por meio da MCGP e de um Algoritmo Genético Híbrido que integra o Algoritmo Genético e uma Algoritmo de Busca de Vizinhança Variável (em inglês VNS). Chen, Liao e Wu (2014) apresentaram um modelo de seleção de localização de centros logísticos com aplicação à indústria aeronáutica. Os métodos Delphi, TOPSIS *fuzzy* e MCGP foram utilizados para auxiliar o processo de tomada de decisão. Qahtani et al. (2019) apresentaram um modelo para um problema de transporte estocástico multiobjetivo considerando a abordagem MCGP.

Kayvanfar et al. (2018) propuseram um modelo multiobjetivo para otimizar os processos de distribuição de suprimentos de entidades localizadas em um grupo industrial, incluindo pequenas e médias empresas e serviços terceirizados de logística. Foram consideradas abordagens *fuzzy* e a MCGP Revisada. Yousefi et al. (2017) desenvolveram um modelo bi-objetivo para o problema de roteamento de veículos com janelas de tempo. As abordagens MCGP Revisada e Meta-heurísticas Algoritmo Genético e *Simulated Annealing* foram utilizadas para resolver o problema. Paydar e Saidi-Mehrabad (2015) apresentaram um modelo bi-objetivo de programação possibilística para o problema de formação de células virtuais dinâmicas e cadeia de suprimentos considerando o planejamento de distribuição, produção e aquisição. Além da Programação Possibilística, foi utilizada a MCGP Revisada para resolver o problema. Shen, Peng e Tu (2019) desenvolveram um modelo de Programação Linear Multiobjetivo para a seleção de fornecedores baseado no ciclo de vida do produto. As abordagens utilizadas incluem consideração de parâmetros e objetivos *fuzzy*, o método AHP e MCGP. Shalke, Paydar e Hajiaghahi-Keshteli (2018) propuseram um modelo multiobjetivo para um problema de seleção de múltiplos fornecedores sustentáveis e alocação de pedidos considerando desconto de quantidades. Foram utilizados o método TOPSIS e a abordagem de MCGP Revisada para a resolução do problema.

Em se tratando de problemas envolvendo logística reversa, poucos foram os trabalhos que consideraram o gerenciamento da cadeia de suprimentos reversa e a Programação por Metas Multiescolha. Mais especificamente, em se tratando do processo logístico de resíduos de papel, de acordo com Defalque et al. (2021), não foram encontrados trabalhos na literatura associando estes dois temas. Além disso, segundo Singh e Sonia (2017), oportunidades de pesquisa considerando modelos de Programação por Metas Multiescolha envolvem problemas de logística reversa, planejamento da produção, problemas de transporte e roteamento de veículos, entre outros.

Na próxima Seção será descrito um modelo de Programação por Metas Multiescolha Revisado para o processo logístico de reciclagem de resíduos de papel.

C.1 CONSIDERANDO INCERTEZA NO PROBLEMA ESTUDADO

No problema estudado, verificou-se variações diárias na quantidade de material disponível para a coleta que acontecem devido a variações na disponibilidade dos resíduos. Desta forma, para incorporar a incerteza, foi considerado uma adaptação do modelo de Programação por Metas Multiescolha Revisado proposto por Chang (2008). A adaptação utilizada incorpora incerteza no parâmetro referente à quantidade de material disponível para coleta, que faz parte tanto de restrições flexíveis, como meta, quanto de restrições rígidas, como limitante. As duas formulações são comparadas a seguir e exemplificadas com dados ilustrativos. Com base na formulação proposta em Silva, Marins e Dias (2015), para os níveis de aspirações foram consideradas variações de p_{1i} e p_{2i} em relação ao valor determinístico da meta, conforme descrito a seguir.

Parâmetros:

p_{1i} percentual utilizado para estimar o limite inferior do intervalo de variação da meta G_i .

p_{2i} percentual utilizado para estimar o limite superior do intervalo de variação da meta G_i .

ψ_i parâmetro que faz parte tanto de restrições flexíveis, como meta, quanto de restrições rígidas, como limitante.

β_i percentual que associa as variáveis auxiliares y e wa_{idt} , descritas a seguir.

Variáveis:

y_i variável auxiliar que possibilita a variação da meta G_i .

wa_i variável auxiliar que possibilita a variação do parâmetro ψ_i .

u_i^- variável de desvio associada ao limite inferior da meta G_i .

u_i^+ variável de desvio associada ao limite superior da meta G_i .

X variável que faz parte das restrições rígidas e flexíveis do problema. $X \in F$, F é um conjunto factível

Exemplo de formulação para o modelo de Programação por Metas proposto por Chang (2008)

$$\text{Min } Z = \sum_{i \in I} (\alpha_i (d_i^- + d_i^+) + \vartheta_i (u_i^- + u_i^+)) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$g_i(X) \leq \text{ou } \geq \text{ou } = \psi_i, \forall i \in I \quad (2)$$

$$f_i(X) + d_i^- - d_i^+ = y_i, \forall i \in I \quad (3)$$

$$y_i + u_i^- - u_i^+ = G_i \times p_{1i} \text{ ou } G_i \times p_{2i}, \forall i \in I \quad (4)$$

$$G_i \times p_{1i} \leq y_i \leq G_i \times p_{2i}, \forall i \in I \quad (5)$$

$$G_i = \beta_i \times \psi_i \forall i \in I \quad (6)$$

$$d_i^-, u_i^-, d_i^+, u_i^+ \geq 0, \forall i \in I \quad (7)$$

$$X \in F, \quad F \text{ é um conjunto factível} \quad (8)$$

Fonte: adaptado de Chang (2008)

Restrições consideradas no modelo proposto neste artigo (adaptado de Chang (2008))

$$\text{Min } Z = \sum_{i \in I} (\alpha_i (d_i^- + d_i^+) + \vartheta_i (u_i^- + u_i^+)) \quad (9)$$

Sujeito a:

$$g_i(X) \leq ou \geq ou = wa_i, \forall i \in I \quad (10)$$

$$f_i(X) + d_i^- - d_i^+ = y_i, i \in I \quad (11)$$

$$y_i + u_i^- - u_i^+ = G_i \times p_{1i} ou G_i \times p_{2i}, \forall i \in I \quad (12)$$

$$y_i = \beta_i \times wa_i, \forall i \in I \quad (13)$$

$$\psi_i \times p_{1i} \leq wa_i \leq \psi_i \times p_{2i}, \forall i \in I \quad (14)$$

$$G_i = \beta_i \times \psi_i, \forall i \in I \quad (15)$$

$$d_i^-, u_i^-, d_i^+, u_i^+ \geq 0, \forall i \in I \quad (16)$$

$$X \in F, F \text{ é um conjunto factível} \quad (17)$$

Fonte: adaptado de Chang (2008)

Para um melhor entendimento dos modelos, a seguir estão as formulações escritas considerando exemplares ilustrativos. Sejam $\beta = 1$, $\psi_1 = 10$, $\psi_2 = 20$, $\psi_3 = 20$, $p_1 = 0,9$, $p_2 = 1,1$ e $G = 55$ ($50 \times p_2$) (adaptado de Chang (2008), Chang (2007))

Modelo proposto por Chang (2008)

$$\text{Min } Z = d^- + d^+ + u^- + u^+ \quad (18)$$

Sujeito a:

$$x_1 \leq 10 \quad (19)$$

$$x_2 \leq 20 \quad (20)$$

$$x_3 \leq 20 \quad (21)$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + d^- - d^+ = y \quad (22)$$

$$y + u^- - u^+ = 55 \quad (23)$$

$$45 \leq y \leq 55 \quad (24)$$

$$x_1, x_2, x_3, d^-, d^+, u^-, u^+ \geq 0 \quad (25)$$

Fonte: adaptado de Chang (2008)

Modelo proposto neste artigo (adaptado de Chang (2008))

$$\text{Min } Z = d^- + d^+ + u^- + u^+ \quad (26)$$

Sujeito a:

$$x_1 \leq wa_1 \quad (27)$$

$$x_2 \leq wa_2 \quad (28)$$

$$x_3 \leq wa_3 \quad (29)$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + d^- - d^+ = y \quad (30)$$

$$y + u^- - u^+ = 55 \quad (31)$$

$$9 \leq wa_1 \leq 11 \quad (32)$$

$$18 \leq wa_2 \leq 22 \quad (33)$$

$$18 \leq wa_3 \leq 22 \quad (34)$$

$$y = wa_1 + wa_2 + wa_3 \quad (35)$$

$$x_1, x_2, x_3, wa_1, wa_2, wa_3, d^-, d^+, u^-, u^+ \geq 0 \quad (36)$$

Fonte: adaptado de Chang (2008)

A solução ótima encontrada no modelo proposto por Chang (2008) é:

$$(x_1, x_2, x_3, v_1, v_2, v_3, d^-, d^+, u^-, u^+, y) = (10, 20, 20, 0, 0, 0, 5, 0, 0, 0, 55)$$

A solução ótima encontrada no modelo proposto neste trabalho é:

$$(x_1, x_2, x_3, v_1, v_2, v_3, d^-, d^+, u^-, u^+, y, wa_1, wa_2, wa_3) = (11, 22, 22, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 55, 11, 22, 22)$$

Observa-se no primeiro modelo $d^- > 0$ devido aos limites impostos pelas restrições (19), (20) e (21). A solução ótima do modelo proposto mostra que houve flexibilização do valor do parâmetro ψ_i em todas as restrições, o que tornou $d^- = 0$.

Portanto, a próxima seção descreverá a proposta deste trabalho que adotará esta estratégia para incorporar a incerteza no parâmetro associado à quantidade disponível de material para coleta.

C.1.1 Restrições com incerteza - Programação por Metas Ponderada Multiescolha Revisada (PMPMR)

Foi elaborado um modelo considerando a possibilidade de variações na quantidade disponível de material para coleta. Como mencionado na seção anterior, verificou-se variações diárias na quantidade de material disponível para a coleta que acontecem devido a variações na disponibilidade dos resíduos,

impactando por exemplo, a produção de fardos, o atendimento à demanda e os níveis de estoque. Assim, para considerar estas variações no parâmetro associado à coleta, a formulação elaborada foi a seguinte:

Parâmetros:

p_1 representa o percentual utilizado para estimar o limite inferior do intervalo de variação da meta π .

p_2 representa o percentual utilizado para estimar o limite superior do intervalo de variação da meta π .

β percentual que associa as variáveis auxiliares y e wa_{idt} , descritas a seguir.

Variáveis:

y variável auxiliar que possibilita a variação da meta π .

wa_{idt} variável auxiliar que possibilita a variação do parâmetro kh_{idt} .

u^- variável de desvio associada ao limite inferior da meta π .

$$\text{Minimizar } Z = \alpha_1 dc^+ + \alpha_2 \sum_{b \in B} \sum_{t \in T} dd_{bt}^+ + \alpha_3 \sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} df_{ict}^- + \alpha_4 \sum_{i \in I} dq_i^- + \quad (37)$$

$$\alpha_5 \sum_{t \in T} da_t^- + \alpha_6 db^- + \alpha_7 \sum_{b \in B} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} dv_{bvt}^- + \alpha_8 \sum_{d \in D} \sum_{b \in B} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} dg_{dbvt}^- + \alpha_9 u^-$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{b \in B} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} q_{idbvt} + db^- \geq y; \quad (38)$$

$$y + u^- \geq \pi p_1 \text{ ou } \pi p_2; \quad (39)$$

$$y = \beta \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} wa_{idt}; \quad (40)$$

$$kh_{idt} p_1 \leq wa_{idt} \leq kh_{idt} p_2 \quad \forall i \in I, d \in D, t \in T. \quad (41)$$

Para considerar incerteza, na função objetivo (2) foi incluída a variável de desvio u^- associada ao limite inferior da meta π e a função objetivo do modelo PMPMR está representada por (37). As restrições (38) - (39) alteram a restrição (22) ao considerar a possibilidade de variação da meta π por meio da variável y . Como a meta π representa um percentual da quantidade de material disponível para coleta (kh_{idt}), ao considerar a possibilidade de variações desta meta verificou-se a necessidade de associar esta variação ao valor de kh_{idt} , que está representada pelas restrições (40) e (41). Assim, no modelo proposto, as restrições (17), (20) e (21) passam a ser representadas pelas restrições (42), (43) e (44), respectivamente, em que o parâmetro kh_{idt} foi substituído pela variável wa_{idt} .

$$wa_{idt} + ed_{idt-1} - \sum_{b \in B} \sum_{v \in V} q_{idbvt} = ed_{idt}, \quad i \in I, d \in D, t \in T; \quad (42)$$

$$\sum_{b \in B} q_{idbvt} \leq wa_{idt} + ed_{idt-1} - \sum_{b \in B} q_{idv-1t}, \quad i \in I, d \in D, v \in V, v \geq 2, t \in T; \quad (43)$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{v \in V} q_{idbvt} \leq wa_{idt} + ed_{idt-1}, \quad i \in I, d \in D, t \in T. \quad (44)$$

APÊNDICE D – MODELO AUXILIAR

O modelo auxiliar apresentado a seguir, foi elaborado com base no problema de roteamento de veículos e no problema do caixeiro viajante assimétrico (LAPORTE, 1992; DESROCHERS; LAPORTE, 1991; MILLER; TUCKER; ZEMLIN, 1960; TOTH; VIGO, 2002) e auxilia a estimação do valor da meta relacionada à distância percorrida por veículo, por viagem e por período $l_{bvt} \forall b \in B, v \in V, t \in T$. Ao usar o modelo auxiliar, é estimada a distância percorrida considerando-se apenas um veículo ($b = 1$) e uma viagem ($v = 1$) para coletar em todos os pontos com material disponível naquele período.

$$\text{Minimizar } \omega = \sum_{t \in T} l_{11t} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in J} x_{dj11t} = 1, \quad d \in D, \quad d \neq j, \quad t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} x_{d_0j11t} \geq \sum_{d \in D} x_{dkbvt}, \quad d \neq d_0, \quad d \neq j, \quad d \neq k, \quad k \in K, \quad t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{d \in D} x_{dk11t} = \sum_{j \in J} x_{kj11t}, \quad k \in K, \quad d \neq k, \quad j \neq k, \quad t \in T \quad (4)$$

$$q_{Cj11t} \geq q_{Cd11t} + 1 - (|D| - 1)(1 - x_{dj11t}), \quad (5)$$

$$j \in J, \quad d \in D, \quad t \in T, \quad d \neq 1, \quad j \neq 1, \quad d \neq j$$

$$\sum_{j \in J} x_{d_0j11t} \leq \sum_{d \in D} x_{d_0d11t}, \quad j \in J, \quad j \neq d_0, \quad t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{j \in J} dt_{dj} x_{dj11t} = l_{11t}, \quad d \neq j, \quad t \in T \quad (7)$$

$$x_{dj11t} \in \{0, 1\}, \quad q_{Cd11t} \geq 0, \quad d \in D, \quad j \in J, \quad t \in T \quad (8)$$

A função objetivo (1) minimiza a soma das distâncias percorridas pelo veículo, durante a viagem, nos períodos $t \in T$. De acordo com as restrições (2), só poderá haver deslocamento de um ponto de coleta $d \in D$ para um único ponto de coleta $j \in J$ pelo veículo, durante a viagem, no período $t \in T$. As restrições (3) garantem que se houve deslocamento pelo veículo, durante a viagem, no período t , de um ponto de coleta qualquer d para um ponto de coleta k , então houve deslocamento do mesmo veículo, durante a viagem, no período t do centro intermediário d_0 para um ponto de coleta j qualquer. As restrições (4) asseguram que se houve deslocamento de um ponto de coleta k para um ponto de coleta j qualquer, no período t , nestas mesmas circunstâncias, houve deslocamento de um ponto qualquer d para o ponto de coleta k . As restrições (5) são restrições de eliminação de subrotas baseadas nas restrições propostas por Miller, Tucker e Zemlin (1960), Desrochers e Laporte (1991). De

acordo com as restrições (6), se houve deslocamento no período t do centro intermediário d_0 para um ponto de coleta j qualquer, então houve deslocamento no período t de um ponto de coleta d qualquer para o centro intermediário. As restrições (7) definem as distâncias percorridas no período t e garantem que essas distâncias só serão computadas quando houver deslocamento de um ponto de coleta d para outro ponto diferente j . As restrições (8) são de domínio das variáveis.

**APÊNDICE E – MODELO WGP NORMALIZADO - TESTE T1 - EXEMPLAR
ILUSTRATIVO**

O código foi elaborado com base em informações e tutoriais disponíveis no próprio software e em Brooke, Kendrick e Meeraus (1997), GAMS Development Corporation (2011), GAMS Development Corporation (2021).

<https://drive.google.com/file/d/13bZOMzHeFqKCWvkuf0464duho4IuRWH2/view?usp=sharing>

APÊNDICE F – MODELO AUXILIAR - EXEMPLAR ILUSTRATIVO

O código foi elaborado com base em informações e tutoriais disponíveis no próprio software e em Brooke, Kendrick e Meeraus (1997), GAMS Development Corporation (2011), GAMS Development Corporation (2021).

<https://drive.google.com/file/d/1c2fDY9zr1ORKKIJzvM3ev5Nw0OuY7XxF/view?usp=sharing>