

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
HUGO ESTEVAN MANCINI CIA

Modelagem matemática multiobjetivo para o desenho de um sistema logístico multimodal sustentável de escoamento de resíduos minerais no mercado de materiais de construção civil

São Paulo

2023

HUGO ESTEVAN MANCINI CIA

Modelagem matemática multiobjetivo para o desenho de um sistema logístico multimodal sustentável de escoamento de resíduos minerais no mercado de materiais de construção civil

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

**São Paulo
2023**

HUGO ESTEVAN MANCINI CIA

Modelagem matemática multiobjetivo para o desenho de um sistema logístico multimodal sustentável de escoamento de resíduos minerais no mercado de materiais de construção civil

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

**Área de Concentração:
Engenharia de Sistemas Logísticos**

**Orientador: Prof. Livre-Docente
Claudio Barbieri da Cunha**

São Paulo

2023

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

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação a versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 01 de Julho de 2023

Assinatura do autor:

Hugo Cia _____

Assinatura do orientador:

Paul _____

Catálogo-na-publicação

Cia, Hugo

Modelagem matemática multiobjetivo para o desenho de um sistema logístico multimodal sustentável de escoamento de resíduos minerais no mercado de materiais de construção civil / H. Cia -- versão corr. -- São Paulo, 2023.

211 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Otimização Linear Multiobjetivo 2.Desenho de Sistemas Logísticos Sustentáveis 3.Economia Circular na Logística I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

A todos que foram impactados com os desastres de Mariana e Brumadinho, de forma direta ou indireta, negativa ou positivamente, e aos tomadores de decisões no design de Sistemas Logísticos, para que se atendem às futuras gerações e aos resultados assertivos que elas possam receber com os frutos deste estudo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus e a Jesus por ser o caminho, a verdade e a vida. Por ser minha rocha, por me fortalecer e sustentar. Ao Espírito Santo, que além de me nutrir de inspiração, sabedoria e conhecimento para o desenvolvimento e conclusão desta dissertação, tem me dado saúde, força de vontade e criatividade para superar os obstáculos enfrentados ao longo da jornada traçada, como uma longa pandemia, uma cirurgia de hérnia inguinal dupla e algumas costelas quebradas.

Serei sempre grato ao professor Claudio Barbieri da Cunha, pela oportunidade de participar deste estudo, por todo o conteúdo conceitual, teórico e prático transmitido ao longo dos anos, por seus livros emprestados durante a pandemia, pelas inúmeras correções e revisões, e pela paciência com minha falta de atenção e dificuldade para escrever. Além de um eterno Mestre e Doutor, é uma ótima pessoa, dono de um coração enorme. Desde o início dos anos 2000, tem me instruído e auxiliado no desenvolvimento da minha carreira acadêmica e profissional, proporcionando, inclusive, a grande chance de participar do curso de pós-graduação no MIT, o GCLOG, concluído em 2017.

Agradecimentos especiais a toda minha família, principalmente ao meu papai e MSc. Geraldo Cia, e mamãe MSc. Erni Maria Mancini Cia, que formam um belo casal e refletem um lindo exemplo de vida; vocês sempre serão meu suporte nos momentos difíceis e minha fonte inspiradora. Às minhas irmãs, em especial à Dra. Elia Elisa Cia Alves, que me ajudou com a correção de alguns trechos e com o planejamento de uma rota bibliográfica para chegar ao meu destino neste estudo. Aos meus queridos sobrinhos, que me alegravam e inspiravam em momentos de dúvida e angústia, principalmente quando precisei recomeçar praticamente do zero na geração e consolidação dos dados, em razão da perda parcial do material pesquisado. Todos, enfim, sempre compreenderam minha ausência em alguns encontros.

Aos professores da banca examinadora, Prof. Dr. Thiago Guilherme Péra e Prof. Dr. Orlando Fontes Lima Jr., por seu tempo e dedicação na leitura desta dissertação, pela correção e sugestões de melhoria. Com sua sabedoria e experiência, trouxeram luz para a continuidade deste trabalho e me fizeram acreditar na sua conclusão.

Aos demais familiares e amigos leitores e revisores que, com suas críticas e debates sobre o tema sustentável na logística, me ajudaram a construir e a desenvolver este estudo. Obrigado por entenderem minha ausência em alguns encontros, motivada pela contínua dedicação a esta pesquisa.

Ao grupo da EMBRAPII CICS Poli USP, formado por colegas engenheiros que buscam alternativas sustentáveis para a substituição de materiais de construção civil com resíduos minerais da cadeia de mineração, transformando, dessa forma, um problema em solução para a construção. Obrigado pelas ricas discussões sobre o tema relacionado ao uso dos resíduos e seu aproveitamento sustentável, diminuindo o iminente risco de rompimento de barragens, com possíveis severas consequências para toda a humanidade.

Agradeço aos autores aqui mencionados, que desenvolveram uma forte base teórica para a evolução deste estudo, proporcionando um cenário que serviu de pano de fundo para a criação do ato principal.

Aos futuros leitores, acadêmicos, profissionais de logística e tomadores de decisões nas empresas, governos e sociedades, agradeço sua curiosidade sobre o tema. Que ela possa gerar boas decisões e base teórica para a continuidade das pesquisas.

Por fim, agradeço à CAPES e à FUSP pela bolsa de auxílio à pesquisa sobre o tema, e à sociedade brasileira como um todo, que ajudou a custear meus estudos.

“Elevo meus olhos para os montes, de onde virá meu socorro?”

Salmos 121:1

“E Jesus lhes disse: Por causa de vossa incredulidade; porque em verdade vos digo que, se tiverdes fé como um grão de mostarda, direis a este monte: Passa daqui para acolá, e há de passar; e nada vos será impossível.”

Mt. 17:20

RESUMO

CIA, Hugo Estevan Mancini. **Modelagem matemática multiobjetivo para o desenho de um sistema logístico multimodal sustentável de escoamento de resíduos minerais no mercado de materiais de construção civil**. 2023. 211 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

Esta pesquisa tem por objetivo propor um modelo de otimização multiobjetivo, para o desenho de um sistema logístico sustentável, responsável por determinar o fluxo ideal sobre um sistema de transporte multimodal capacitado, otimizado com base objetivos dos pilares da sustentabilidade. O modelo proposto foi aplicado ao desenho de uma rede logística para escoamento de um produto tipo granel sólido, de uma origem – Brucutu (MG) – para múltiplos destinos. Trata-se de um mineral ultrafino, resíduo da extração do minério de ferro que, devido às suas características físico-químicas, pode ser usado como substituto parcial de matérias-primas para diferentes produtos da construção civil, como o clínquer, cimento composto, concretos e cerâmica vermelha. O modelo tem como objetivo inicial a maximização do lucro total; os demais objetivos buscam minimizar os impactos socioambientais negativos e a maximizar os positivos, trazendo como resultado uma configuração da rede otimizada em termos econômicos, sociais e ambientais, pilares fundamentais da sustentabilidade, estando, dessa maneira, alinhado aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU). Essa substituição de matérias primas possibilita a geração uma economia de recursos naturais e redução de emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) na cadeia da construção civil. Em razão de seu baixo valor e da quantidade massiva a ser transportada, e a fim de viabilizar essa substituição em termos econômicos, a logística carrega consigo um papel fundamental. O sistema logístico multimodal proposto, enfim, viabiliza economicamente a conexão dos elos da *supply chain* da mineração, para abastecer o mercado de materiais de construção civil e integra, dessa forma, decisões comerciais de preço de venda e alcance de mercado com decisões logísticas referentes ao custo logístico das alternativas multimodais, ambas em conformidade com as esferas do desenvolvimento sustentável e da economia circular.

Palavras-chave: Otimização multiobjetivo. Desenho de sistemas logísticos sustentáveis. Economia circular na logística.

ABSTRACT

CIA, Hugo Estevan Mancini. **Multiobjective mathematical modeling for the design of a sustainable multimodal logistic system to the disposal of mineral waste in the civil construction materials market.** 2023. 211 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

This research aims to propose a multiobjective optimization model for the design of a sustainable logistics system, responsible for determining the ideal flow on a capable multimodal transport system, optimized based on the objectives of the pillars of sustainability. The proposed model was applied to the design of a logistic system for the flow of a solid bulk product, from one origin – Brucutu (MG) – to multiple destinations. It is an ultra-fine mineral, residue from the extraction of iron ore which, due to its physical and chemical characteristics, can be used as a partial substitute for raw materials for different construction products, such as clinker, composite cement, concrete and red ceramic. The model's initial objective is to maximize total profit; the other objectives seek to minimize the negative socio-environmental impacts and maximize the positive ones, resulting in an optimized configuration of the logistic system in economic, social and environmental terms, fundamental pillars of sustainability, thus being aligned with the Sustainable Development Goals (SDGs) of the United Nations (UN). This substitution of raw materials makes it possible to save natural resources and reduce Greenhouse Gas (GHG) emissions in the construction chain. Due to its low value and the massive amount to be transported, and in order to make this substitution feasible in economic terms, logistics plays a fundamental role. Finally, the proposed multimodal logistics system makes it economically viable to connect the links in the mining supply chain to supply the construction materials market and thus integrates commercial decisions regarding sales price and market reach with logistical decisions regarding the logistical cost of multimodal alternatives, both in line with the spheres of sustainable development and the circular economy.

Keywords: Multi-objective linear optimization. Sustainable logistics systems design. Circular economy in Logistics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 – Níveis de decisão em Sistemas Logísticos Sustentáveis	22
Figura 2-2 – Modelagem rede multimodal de Custo Generalizado.....	27
Figura 2-3 – Análise de sistemas dinâmicos sob a ótica dos TBL	32
Figura 3-1 – Alternativas dos sistemas logísticos multimodais	39
Figura 3-2 – Características físico-químicas dos coprodutos do tratamento do minério de ferro	42
Figura 3-3 – Mutualismo industrial e compartilhamento de <i>Supply Chain</i>	42
Figura 3-4 – Conexões do sistema logístico multimodal	45
Figura 3-5 – Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais – Brasil	45
Figura 3-6 – Corredores do Sistema Logístico – Regiões Norte e Nordeste.....	47
Figura 3-7 – Corredores do Sistema Logístico – Regiões Sudeste e Sul	48
Figura 3-8 – Corredores do Sistema Logístico.....	49
Figura 3-9 – Corredores e fluxos do Sistema Logístico proposto	49
Figura 4-1 – Metodologia de Desenho de Sistemas Logísticos Sustentáveis com Otimização Multiobjetivo	52
Figura 4-2 – Representação gráfica das relações entre parâmetros.....	54
Figura 4-3 – Representação gráfica das relações entre parâmetros na Logística	54
Figura 4-4 – Distâncias entre hubs mais próximos: linha reta x distâncias reais	56
Figura 4-5 – Estudos com Dimensões da Sustentabilidade.....	60
Figura 4-6 – Fluxo de recursos sobre os elos da cadeia de valor na economia circular.....	63
Figura 4-7 – Fronteira de Pareto-Ótima	65
Figura 4-8 – Método do ϵ -restrito.....	66
Figura 4-9 – Canais de vendas do MUFA e porcentagens de substituição de matéria-prima..	68
Figura 4-10 – Demanda estimadas de coproduto por canal e por cidade (t/sem).....	71
Figura 4-11 – Demanda estimadas de coproduto por cidade em (t/sem)	71
Figura 4-12 – Demanda estimadas de Coproduto por cidade, agrupadas por mesorregião (t/sem)	72
Figura 4-13 – Legenda 106 mesorregiões com demanda em potencial	74
Figura 4-14 – Sistema Logístico Ferroviário – Classificação: alternativas consideradas: A, B, C, D, E	75
Figura 4-15 – Fórmula de Colson: capacidade instalada.....	77
Figura 4-16 – Sistema Logístico Aquaviário, tipo Cabotagem, opções F e G	78
Figura 4-17 – Custo do frete rodoviário em função da distância– granéis sólidos, Tabela “C”	81
Figura 4-18 – Sistema Logístico Rodoviário.....	82

Figura 4-19 – Esferas de Sustentabilidade envolvidas no projeto.....	84
Figura 4-20 – Modelo Geral de Economia Circular adaptado para caso do uso de coprodutos da extração e beneficiamento do minério de ferro como substituintes de matérias-primas de materiais de construção	84
Figura 4-21 – Consumo de Combustíveis no Transporte 1990-2019.....	89
Figura 4-22 – Consumo de combustível por modais de transporte – óleo diesel (l /tku).....	90
Figura 4-23 – Emissões nas atividades do Setor de Energia (1970-2019)	92
Figura 4-24 – Emissões por modos de transporte do Setor de Energia em 2019	92
Figura 4-25 – Emissão de GEE (equivalente CO ₂) por sistema de transporte (t CO ₂ /TKU)...	93
Figura 4-26 – Vazamento de óleo entre modais (galões vazados por milhão de tons-milhas)	98
Figura 4-27 – Delimitação genérica da fronteira dos sistemas a serem estudados, referentes aos produtos em desenvolvimento no projeto.....	99
Figura 4-28 – Vítimas fatais em acidentes por tipo de transporte	104
Figura 4-29 – Painel de Informações do CAGED.....	107
Figura 4-30 – Decomposição do PIB de transporte, armazenagem e correio	108
Figura 5-1 – Lucro Total (médio entre os três canais) (R\$/t).....	120
Figura 5-2 – Desenho da rede de transportes do Sistema Logístico obtido por mesorregião	120
Figura 5-3 – Comportamento dos CLT, RT e LT por demanda atendida	121
Figura 5-4 – Resultado dos modais por mesorregião após a seleção e nova otimização	123
Figura 5-5 – Variação dos parâmetros com a variação do ϵ -restrito – consumo de combustíveis	129
Figura 5-6 – Variação dos pilares da sustentabilidade de acordo com ϵ	131
Figura 5-7 – Curvas do comportamento da sustentabilidade de acordo com os cenários de diferentes pesos dos respectivos pilares	132
Figura 5-8 – Curvas de Pareto – variação dos pilares socioambientais em função do pilar econômico.....	135
Figura 5-9 – Fluxos entre os modos de transporte do sistema logístico e estados – ponto sustentável	135
Figura 5-10 – Superfície de Pareto – Pilares da Sustentabilidade x Variação do ϵ -Restrito .	138
Figura 0-1 – Sistema Logístico Multimodal Brasileiro	161
Figura 0-2 – Evolução da Matriz de Transporte no Brasil	163
Figura 0-3 – Tipos de Produtos transportados.....	171
Figura 0-4 – Trechos sob concessão e supervisão da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT).....	172
Figura 0-5 – Ferrovia EFMV e suas interconexões.....	173
Figura 0-6 – Ferrovia MRS e suas interconexões.....	174
Figura 0-7 – Ferrovia FCA e suas interconexões	175
Figura 0-8 – Ferrovia ALL/SP e suas interconexões.....	176

Figura 0-9 – Ferrovia ALL Sul e suas interconexões	177
Figura 0-10 – <i>Hubs</i> de Integração – Ouro Preto e Pirapora (MG)	178
Figura 0-11 – <i>Hubs</i> de Integração Vale – Uberaba, Araguari (MG) e Palmeirante (TO)	179
Figura 0-12 – <i>Hubs</i> de Integração Vale – Santa Luzia (MG), Guará (SP) e Porto Nacional (TO)	180
Figura 0-13 – Exemplos de equipamentos de carga/descarga e armazenamento.....	181
Figura 0-14 – Exemplos de vagões a serem considerados no estudo	182
Figura 0-15 – Rotas multimodais para escoamento de minério de ferro através de cabotagem, a partir dos portos de Tubarão, Ilha Guaíba e Itaguaí	183
Figura 0-16 – <i>Hubs</i> portuários aptos para cabotagem de granéis sólidos	183
Figura 0-17 – <i>Hub</i> Portuário Terceirizado (Carga) – Itaguaí/RJ. Fonte: ANTAQ, (2021)....	184
Figura 0-18 – <i>Hub</i> portuário terceirizado – Aracruz (ES).....	184
Figura 0-19 – <i>Hub</i> portuário de Tubarão.....	184
Figura 0-20 – Terminal Integrador Portuário Luiz Antônio Mesquita (TIPLAM)	185
Figura 0-21 – Terminal Marítimo Inácio Barbosa (TMIB).....	185
Figura 0-22 – Terminal Portuário São Luís (TPSL).....	186
Figura 0-23 – <i>Hub</i> portuário Pecém	186
Figura 0-24 – Tipos de navios - Cabotagem.	187
Figura 0-25 – Áreas de influência das hidrovias	188
Figura 0-26 – Bacia do Rio São Francisco	189
Figura 0-27 – Porto de Pirapora	189
Figura 0-28 – Hidrovia do Rio São Francisco	190
Figura 0-29 – Bacia do Rio Paraná-Tietê	191
Figura 0-30 – Portos disponíveis – Hidrovia Rio Paraná-Tietê	192
Figura 0-31 – Barcaças tipo rio São Francisco.....	192
Figura 0-32 – Barcaças tipo rio Tiete-Paraná.....	193
Figura 0-33 – Sistema Nacional de Viação	194
Figura 0-34 – Trechos sobre concessão e supervisão da ANTT	195
Figura 0-35 – Veículos de transporte de granéis sólidos (minerais)	196
Figura 0-36 – Localização das cidades com fábricas de clínquer	201
Figura 0-37 – Localização das cidades com fábricas de cerâmica vermelha	202
Figura 0-38 – Localização das cidades com empresas de serviço de concretagem	203
Figura 0-39 – Corredor EFVM Leste e Cabotagem Costa Nordeste e Sul/Sudeste	206
Figura 0-40 – Corredor FCA Nordeste e Hidrovia São Francisco	206
Figura 0-41 – Corredor FCA Centro-Oeste e Hidrovia Tietê.....	207
Figura 0-42 – Corredor MRS Sul e Sudeste.....	207

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Resumo da Revisão Bibliográfica – Artigos consultados	24
Tabela 4-1 – Participação média (%) de clínquer por tipo de cimento composto – Brasil	69
Tabela 4-2 – Custo de movimentação dos <i>hubs</i> ferroviários considerados.....	76
Tabela 4-3 – Custos fixos e variáveis das tabelas de piso mínimo.....	81
Tabela 4-4 – Impactos gerados na SC do Minério de Ferro e da SC da Construção Civil	86
Tabela 4-5 – Relação dos indicadores de impactos socioambientais positivos e negativos.....	88
Tabela 4-6 – Consumo de óleo diesel relativo (km/l.t) a capacidade de carga e número de pneus por tipo de caminhão	90
Tabela 4-7 – Fontes, características e efeitos dos principais poluentes na atmosfera	94
Tabela 4-8 – Emissões de NOx, SOx, CO e MP por modo de transporte.....	94
Tabela 4-9 – Composição do material de banda de rodagem do pneu	96
Tabela 4-10 – Parâmetros ambientais positivos – benéficos	101
Tabela 4-11 – Índice de perda por modo de transporte	102
Tabela 4-12 – Custeamento dos acidentes em transportes – Seguro.....	103
Tabela 4-13 – Movimentação anual em bilhões de tku e Matriz de Transportes de Cargas ..	104
Tabela 4-14 – Vítimas fatais por bilhões de tku – por tipo de transporte.....	104
Tabela 4-15 – Ruídos emitidos – DBs por tku – por tipo de transporte	106
Tabela 4-16 – Indicador de vagas de emprego geradas a cada milhão de tkus	107
Tabela 4-17 – Contribuição de Renda do PIB – por tku – por sistema de transporte	109
Tabela 4-18 – Pesos (<i>wn</i>) de importância de cada pilar da sustentabilidade	117
Tabela 5-1 – Matriz de utilização do sistema logístico multimodal resultante do modelo – com e sem restrições de capacidade	124
Tabela 5-2 – Resultados totais do modelo objetivo – com e sem restrições de capacidade...	125
Tabela 5-3 – Impactos socioambientais – com e sem restrições de capacidade.....	125
Tabela 5-4 – Matriz logística da metodologia do ϵ -restrito de consumo de combustíveis.....	127
Tabela 5-5 – Resultados dos parâmetros ambientais positivos	130
Tabela 5-6 – Comparação entre o ponto inicial ótimo (sem restrição ϵ) e com restrição ($\epsilon=655$ kl/sem)	136
Tabela 0-1 – Estimativa de clínquer por fábricas – somente cidades com produção – Brasil	204
Tabela 0-2 – Classificação de tamanho de minas por faixas de produção bruta (t/ano)	205
Tabela 0-3 – Amostra da estimativa de demanda (t/ano) das cidades com empresas de concreto	205
Tabela 0-4 – Custo logístico aquaviário, opção F, quatro <i>hubs</i> TUPs (próprios)	208
Tabela 0-5 – Custo logístico aquaviário, opção G, 24 <i>hubs</i> Portos Organizados (públicos e privados)	208
Tabela 0-6 – Custo Logístico aquaviário – Hidrovia Paraná-Tietê	209

Tabela 0-7 – Custo Logístico Aquaviário – Hidrovia São Francisco.....	209
Tabela 0-8 – Otimização multiobjetivo variando diferentes objetivos primários	210
Tabela 0-9 – Resultados dos parâmetros de a variação do ϵ -restrito.....	211
Tabela 0-10 – Diferenças de ϵ com ponto inicial - metodologia multiobjetivo do ϵ -restrito .	211

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ABESC	Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AHP	Análise Hierárquica de Processos
AL	Alagoas
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
BSC	Balanced Scorecard
CAGED	Cadastro Geral de Empregados e Desempregados
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
CC	Custo de Carga e Descarga
CD	Custo de Deslocamento
CE	Ceará
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CF	Custo do Frete
CG	Custo Generalizado
CLSC	Closed Loop Supply Chain
CLM	Council of Logistics Management
CLT	Custo Logístico Total
CLT Rod	Custo Logístico Total do Modo Rodoviário
CLTV	Custo Logístico Total Virtual
CNA	Confederação Nacional da Agropecuária
CND	Contribuição Nacionalmente Determinada
CNT	Confederação Nacional de Transporte
CODESA	Companhia das Docas do Espírito Santo
CONIT	Conselho Nacional de Integração de Políticas de Transporte
COP 26	Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
COVID-19	Coronavirus Disease 2019
CP	Custo de Pedágio
CSCMP	Council of Supply Chain Managemen Professionals
CTe	Conhecimento de Transporte Eletrônico
CTRC	Conhecimento de Transporte Rodoviário de Carga

CVTT	Custo Virtual do Tempo de Transferência
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DF	Distrito Federal
EC	Economia Circular
EDI	Electronic Data Interchange
EFVM	Estrada de Ferro Vitória-Minas
EGS	Environmental, Safety and Governance
EMBRAPII	Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial
EMF	Ellen MacArthur Foundation
EPL	Empresa de Planejamento e Logística
EUA	Estados Unidos da América
FAHP	Fuzzy Analytic Hierarchy Process
FCA	Ferrovia Centro-Atlântica
FGV	Fundação Getúlio Vargas
FRMM	Fundo de Renovação da Marinha Mercante
FRN	Fundo Rodoviário Nacional
FSC	Fator Crítico de Sucesso
GA	Genetic Algorithm
GEE	Gases do Efeito Estufa
GEIPOT	Grupo Executivo de Integração da Política de Transportes
GHG	Green House Gases
GNDI	Global Network of Director Institute
GRI	Global Report Initiative
GS	Granéis Sólidos
GSC	Green Supply Chain
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGPM	Índice Geral de Preços do Mercado
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
LCA	Life Cycle Analysis
LT	Lucro Total
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis
MFA	Minerais Finos Arenosos
MG	Minas Gerais

MP	Medida Provisória
MUFA	Minerais Ultrafinos Argilosos
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinante
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
OLM	Otimização Linear Multiobjetivo
ONG	Organização Não Governamental
ONU	Organização das Nações Unidas
OTM	Operador de Transporte Multimodal
PA	Poluentes Ambientais
PEMC	Política Estadual de Mudanças Climáticas
PIB	Produto Interno Bruto
PIL	Programa de Investimento em Logística
PIM	Programação Interna Mista
PHE	Plano Hidroviário Estratégico
PL	Programação Linear
PLIM	Programação Linear Interna Mista
PMOL	Programação Multiobjetivo Linear
PNC	Programa Nacional de Concessões
PND1	Plano Nacional de Desenvolvimento de Dragagem
PNIH	Plano Nacional de Integração Hidroviário
PNLT	Plano Nacional de Logística e Transporte
PNMA	Política Nacional do Meio Ambiente
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB	Política Nacional de Segurança em Barragens
PO	Pesquisa Operacional
RFSA	Rede Ferroviária Federal Sociedade Anônima
RLEC	Conselho Executivo de Logística Reversa
RSC	Responsabilidade Social Corporativa
RTN	Resource-Task-Network
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SC	Supply Chain
SCM	Supply Chain Management
SSCM	Sustainable Supply Chain Management
SCND	Supply Chain Network Design

SFLP	Simetric Fuzzy Linear Programming
SIDAC	Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção
SLS	Sistema Logístico Sustentável
SMART	Simple Multi-Attribute Rating Technique
SNIC	Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento
SNV	Sistema Nacional de Viação
SP	São Paulo
TBL	Triple Botton Chain
TKU	Toneladas por Quilômetro Útil
TMIB	Terminal Marítimo Inácio Barbosa
TPSL	Terminal Portuário de São Luis
TUP	Terminal de Uso Privado
USM	Usina de Tratamento de Minério
USP	Universidade de São Paulo
UTM	Usina de Tratamento de Minério

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	DESENHO DE UM SISTEMA LOGÍSTICO MULTIMODAL SUSTENTÁVEL	22
2.1.1	Otimização linear objetivo	26
2.1.2	Algoritmos genéticos	30
2.1.3	Simulação e sistemas dinâmicos	31
2.1.4	Análises Multicriteriais (MCDA)/Análise Hierárquica de Processos (AHP)	33
2.1.5	Otimização Linear Multiobjetivo (OLM)	34
3	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVOS	38
3.1	ESPECIFICAÇÃO DOS DADOS	41
3.1.1	Considerações do produto: características físico-químicas do coproduto	41
3.1.2	Características mercadológicas do coproduto	43
3.1.3	Características do sistema logístico utilizado	44
4	MATERIAL E MÉTODOS	51
4.1	REFERENCIAL TEÓRICO E CONCEITOS UTILIZADOS NA METODOLOGIA PROPOSTA	52
4.1.1	<i>Hubs</i> – terminais logísticos	53
4.1.2	Relações entre variáveis	53
4.1.3	Distâncias entre rotas dos modos de transporte	55
4.1.4	<i>Supply Chain</i> Sustentáveis e Economia Circular	56
4.1.5	Métodos de resolução de problemas de otimização multiobjetivos	64
4.2	CONSIDERAÇÕES DO SISTEMA LOGÍSTICO PARA MODELAGEM	68
4.2.1	Estimativa de demanda do mercado	68
4.2.2	Impactos gerados na <i>Supply Chain</i> do minério de ferro e construção civil	83
4.3	MODELO PROPOSTO	109
4.4	CENÁRIOS DE PESOS DIFERENCIADOS ENTRE OS PILARES DA SUSTENTABILIDADE	116
5	RESULTADOS	118
5.1	RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO INICIAL	118
5.1.1	Seleção das mesorregiões mais lucrativas	122
5.1.2	Análise dos gargalos logísticos	123

5.2	RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO - ANÁLISE DO E-RESTRITO	126
5.3	ANÁLISE DE CENÁRIOS APLICADA A ESTRATÉGIAS EMPRESARIAIS OU POLÍTICAS PÚBLICAS	130
5.4	ANÁLISE DE <i>TRADE OFF</i> – CUSTO-BENEFÍCIO APLICADA AO CENÁRIO 1	133
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	139
	REFERÊNCIAS	142
	APÊNDICES	161
	APÊNDICE A – SISTEMAS LOGÍSTICOS DE ESCOAMENTO DE GRANÉIS SÓLIDOS NO BRASIL	161
	APÊNDICE B – TRANSPORTES MULTIMODAIS	169
	APÊNDICE C – LOGÍSTICA REVERSA	196
	Motivos e Fatores Críticos de Sucesso	199
	APÊNDICE D – LOCALIZAÇÃO E ESTIMATIVA DE DEMANDA DO MERCADO DE CONSTRUÇÃO	201
	APÊNDICE E – ANÁLISE DE CAPACIDADES DOS GARGALOS DOS CORREDORES EM (T/SEM)	206
	APÊNDICE F – CUSTOS LOGÍSTICOS	208
	APÊNDICE G – ESTUDO PARALELO COM TROCA DE OBJETIVOS	210
	APÊNDICE H – RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO – ANÁLISE DE <i>TRADE OFF</i>	211

1 INTRODUÇÃO

Em decorrência dos recentes desastres ocorridos em Mariana e Brumadinho (MG), com sérias consequências socioambientais e econômicas, a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010) e a Política Nacional de Segurança em Barragens (PNSB) (BRASIL, 2020), que regulamentam e restringem o uso de barragens de rejeitos pelas mineradoras, têm ganhado maior destaque na sociedade.

A repercussão na mídia e a pressão de Organizações Não Governamentais (ONGs) e do poder público têm levado as empresas mineradoras a buscar soluções para reduzir a quantidade de resíduos acumulados nas barragens de rejeitos e, conseqüentemente, o risco de acidentes. Uma das possíveis alternativas para mitigar a concentração de rejeitos nas barragens é o seu aproveitamento (um material ultrafino/argiloso e outro arenoso) como substitutos parciais de matérias-primas da construção civil (argila e calcário, recursos naturais) para as indústrias de cimento (clínquer), de concreto e de cerâmica vermelha.

Para que esse aproveitamento seja economicamente viável e aplicável na prática, um dos grandes desafios a ser superado é a logística que conecta a *Supply Chain* da mineração com o mercado de materiais de construção. Esse desafio se dá principalmente devido a enorme quantidade de produto a ser escoada de uma origem (mina de Brucutu), que concorre diretamente com a exportação do minério de ferro e outros produtos que utilizam os meios de transporte com capacidade restrita do sistema logístico no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais.

Cabe ressaltar que o produto é um mineral de baixo valor agregado (um resíduo da extração e beneficiamento do minério de ferro), que competirá com os produtos a serem substituídos, quais sejam, a argila e calcário. Dessa forma, o custo logístico é o componente mais importante para a composição do custo final desse coproduto.

Os rejeitos podem então ser segmentados como substitutos parciais de matérias primas para a indústria da construção civil, em três diferentes canais mercadológicos: de clínquer, de cerâmica vermelha e de concreto.

Com o propósito de atender a essas demandas, o sistema logístico multimodal (rodoviário, ferroviário e aquaviário) que pode ser utilizado para o escoamento e distribuição dos resíduos é composto por infraestruturas logísticas distintas que conectam os diferentes tipos de transporte multimodal. Os chamados *hubs*, terminais de transbordo que conectam diferentes

modos de transporte podem ser próprios ou de terceiros, localizados em lugares diversos. Podem ainda ser preparados (com equipamentos de carga e descarga apropriados) ou não para o tipo de produto em questão – granel mineral sólido, com variados custos de transporte e transbordo, sendo apenas limitados pelas respectivas capacidades de transporte dos trechos que os conectam.

Diante do cenário estabelecido com múltiplas alternativas de componentes do sistema logístico multimodal, tendo em vista a viabilização comercial e transformação desse rejeito em coproduto, o problema objeto desta pesquisa prende-se à definição de qual é o desenho ideal do fluxo sobre esse sistema logístico multimodal capacitado, ou seja, qual a melhor configuração das alternativas e conjugações dos componentes desse sistema para atendimento da demanda de cada canal mercadológico em potencial estabelecido, respeitando as capacidades de transporte definidas e considerando a venda e receita do produto a partir de um preço pré-determinado por mesorregião e canais mercadológicos.

Outro grande desafio decorrente do sistema logístico a ser concebido é contemplar, além dos respectivos custos logísticos, as decorrentes externalidades causadas pelos impactos econômicos e socioambientais gerados com o fluxo do coproduto sobre o novo sistema logístico proposto.

A avaliação dos impactos socioambientais e do aspecto econômico amplia a visão para tomada de decisões de planejamento de sistemas logísticos. Nas duas últimas décadas, a inclusão dos aspectos socioambientais, amparada pelas três esferas da sustentabilidade, ganhou grande relevância tanto no meio empresarial quanto acadêmico, conforme observado por Mota et al. (2018) e Eskandarpour et al. (2015).

A gestão dos impactos socioambientais tanto benéficos quanto prejudiciais decorrentes do sistema logístico a ser concebido, do coproduto a ser viabilizado economicamente são evidenciados nesse estudo. Isso pode se converter em um fator de diferenciação competitiva para o meio empresarial, cumprindo plenamente as novas regulamentações dos governos locais – notadamente, no Brasil, a Contribuição Nacionalmente Determinada, ou NDC (MCTIC, 2017), as diretrizes internacionais cada vez mais restritivas (ONU, 2000) e a *United Nations Framework Convention on Climate Change (COP26)*.

Portanto, para a decisão de desenho e planejamento de novos sistemas logísticos, é de fundamental importância considerar, além dos aspectos econômicos, formados principalmente pelo Lucro Total (LT), que contempla o custo logístico e as diferentes receitas potenciais

envolvidas por cada mesorregião e canal mercadológico, os impactos socioambientais decorrentes da configuração do sistema logístico multimodal obtido. Essa consideração pode ser descrita por meio de objetivos, desdobrada em parâmetros, variáveis de decisão, restrições e componentes do modelo. Porém os parâmetros estabelecidos possuem características multidimensionais, que por sua vez podem resultar em objetivos conflitantes entre si. Muitas vezes para se obter um menor impacto ambiental com a utilização de um modo de transporte menos prejudicial ao meio ambiente é necessário um maior custo logístico, o que diminui o resultado do lucro do objetivo econômico. Portanto, a otimização linear multiobjetivo foi adotada a fim de se considerar um objetivo sustentável, composto pela integração dos objetivos que envolvem as esferas econômica, ambiental e social.

Nesse sentido, enquanto o objetivo econômico prende-se à uma maior lucratividade, a esfera ambiental em contrapartida requer um menor consumo de recursos naturais de fontes não renováveis, como o petróleo e o diesel, consumo de pneus, as emissões de poluentes atmosféricos. Além de menores emissões de resíduos líquidos e sólidos (vazamento de combustíveis e detritos de pneus) e os gasosos, como os gases de efeito estufa, que por sua vez são causadores de mudanças climáticas, desastres naturais e de possíveis doenças cardiorrespiratórias (GUTIERREZ, 2009).

Quanto à esfera social, notam-se os impactos negativos gerados principalmente pela emissão de ruídos, pelas perdas ao longo do percurso que causam sujidades e pelos acidentes fatais de trânsito, com maiores consequências para toda a sociedade. Por outro lado, pode-se mencionar os impactos sociais positivos, como a geração de emprego e renda e a contribuição para com o Produto Interno Bruto (PIB).

Visando ampliar a abrangência da tomada de decisão para um nível ainda mais estratégico, também é preciso ponderar sobre a inclusão da esfera ambiental positiva no modelo, constituída pelos diferentes benefícios ambientais gerados pela substituição das respectivas matérias-primas de cada canal de materiais de construção civil considerados. Dessa maneira, este estudo inclui, na mesma metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) simplificada aplicada, a comparação dos diferentes processos produtivos de cada canal mercadológico de materiais para a construção civil, identificando os seguintes parâmetros a serem considerados na esfera ambiental positiva, que podem vir a compor o novo modelo: Consumo de Energia, Consumo de Recursos, Geração de Coproduto e Emissões de CO_2 .

Logo, esta pesquisa propõe uma modelagem que também pondera sobre esse tipo de análise sustentável, mais ampla e que pode ser estruturada a partir da ótica das três esferas da sustentabilidade, ou 3P – *People, Profit and Planet*, projetadas sobre um modelo multiobjetivo, em consonância com Barbosa-Povoa et al. (2018), Mohebalizadehgashti et al. (2020) e Varsei e Polyakovskiy (2017), entre outros.

Nesse contexto, o objetivo central deste estudo é obter um desenho do sistema logístico multimodal capacitado otimizado inicialmente em termos econômicos, visando fornecer condições mercadológicas viáveis para a comercialização desse produto no mercado.

Como objetivos específicos, têm-se o aprimoramento de toda a gestão da cadeia de suprimentos sob uma perspectiva sustentável, que considera seus impactos socioambientais e que torna, ao mesmo tempo, todo o sistema logístico mais competitivo e sustentável, de acordo com as macroestratégias envolvidas. Outrossim, este trabalho também pode ser um instrumento que possibilita a avaliação de novas estratégias e políticas públicas para melhorar a sustentabilidade na logística.

Ou seja, adicionalmente, a análise do desenho proposto possibilita o exame, em um nível mais estratégico e tático, do benefício (redução de custos logísticos e impactos socioambientais) de operações próprias ou terceiras, ou do benefício da inclusão de rotas alternativas, ou ainda a consideração de outros modos de transporte de granéis, além de permitir a identificação dos gargalos da rede, podendo servir de base para eventuais estudos de priorização projetos de investimento de aumento de capacidade.

A aplicação do modelo multiobjetivo e a análise dos resultados obtidos pretendem, portanto, integrar decisões de desenho de rede uma forma holística e criar uma interface entre logística, comercialização e *marketing* sob a ótica da sustentabilidade, interagindo entre decisões de níveis logísticos-operacionais (determinação dos fluxos e decorrentes, localização de *hubs* e tipo de *hubs* utilizados, sejam eles próprios, terceiros, preparados ou não para operar um produto granel mineral sólido) a níveis táticos de posicionamento e precificação diferenciada de produto por canal e região e, conseqüentemente, a definição das fronteiras mercadológicas do coproduto, sob a perspectiva da visão estratégica, envolvendo a ótica da sustentabilidade para o desenho do sistema logístico proposto.

Ao envolver a questão sustentável, cria-se suporte para o desenvolvimento de um novo negócio ao aproveitar o resíduo de uma cadeia extrativista como matéria-prima para outra,

consumista de recursos naturais, formando bases socioeconômicas para a economia circular, com impactos positivos para o meio ambiente.

A continuidade deste trabalho está estruturada da seguinte forma:

No Capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica que foi construída em ordem cronológica e em conformidade com o aumento da complexidade para problemas de desenho de sistemas logísticos multimodais, e alguns exemplos de modelos matemáticos multiobjetivos e diferentes métodos de resolução são elucidados.

Posteriormente, o Capítulo 3 descreve o problema do desenho de sistemas logísticos sustentáveis e a otimização multiobjetivo proposta para aplicação em um estudo de caso real. As considerações do físico-químicas do produto, mercadológicas e do sistema logístico são apresentadas em seguida.

No capítulo 4, inicialmente, um referencial teórico discorre sobre as metodologias aplicadas ao estudo de caso, juntamente com o modelo multiobjetivo sugerido; em um segundo momento, as considerações e justificativas dos respectivos impactos socioambientais do sistema logístico proposto, juntamente com o modelo são detalhados. Além disso, ao final, são descritos alguns cenários pensados para efeito comparativo do comportamento da sustentabilidade em função dos diferentes pesos relativos à importância de cada pilar.

No Capítulo 5, os resultados da modelagem são apresentados e avaliados, sendo que, ao Cenário 1, aplicou-se uma análise de *trade off* – Custo-Benefício entre a variação do € restrito e os parâmetros socioambientais estabelecidos.

Por fim, o Capítulo 6 versa a importância dessa pesquisa e sua aplicabilidade é comentada e concluída.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DESENHO DE UM SISTEMA LOGÍSTICO MULTIMODAL SUSTENTÁVEL

Na literatura são encontradas diversas abordagens sobre problemas relacionados ao desenho de uma rede de um sistema logístico multimodal, que são classificadas por Chaabane et al. (2012) em níveis de tomadas de decisão: – mais especificamente, as decisões táticas, que tratam do fluxo de produtos pela rede do sistema logístico e as estratégicas de planejamento integrado da *Supply Chain* com outras áreas, envolvendo decisões integradas entre fornecedores, compras, produção (abertura e fechamento de instalações), armazenagem, distribuição roteirização e vendas, conforme se observa na Figura 2-1.



Figura 2-1 –Níveis de decisão em Sistemas Logísticos Sustentáveis
Fonte: Adaptado de Chaabane et al. (2012) e Ignácio e Ferreira Filho (2004)

Ignácio e Ferreira Filho (2004) relacionam os níveis de tomada de decisão com o período da frequência de tomada de decisões. Enquanto as decisões táticas-operacionais são mais constantes no planejamento da operação diária, as decisões estratégicas de aberturas e fechamento de CDs ou de novas rotas multimodais apresentam menor periodicidade.

Segundo Jiang et al. (1999), esse alinhamento estratégico para desenho de sistemas logísticos pode ser classificado de acordo com o prazo – fatores de longo prazo (natureza, localização, tamanho, sistemas de informação, estrutura e posse de veículos pelas empresas) e

fatores de curto prazo (atributos físicos dos bens e características físicas e de distribuição espacial dos fluxos de transporte).

Os principais artigos sobre o tema de desenho de sistema logísticos multimodais, pesquisados para este estudo, ilustradas pela Figura 2-1, foram agrupados de acordo com as considerações e abordagens adotadas com relação aos níveis de tomada de decisão, conforme proposto por Chaabane et al. (2012).

Paralelamente, esses artigos foram classificados segundo análise da revisão bibliográfica realizada por Gonzalez et al. (2015), em modelos de otimização (único ou multiobjetivos), algoritmos genéticos, simulações e abordagens de multicritérios, solucionados com base em técnicas variadas de pesquisa operacional e resumidos na Tabela 2-1.

A primeira seção da revisão bibliográfica compreende a revisão das técnicas da pesquisa operacional aplicáveis ao problema de desenho de redes. A subseção 2.1.1 discorre sobre a otimização linear com o objetivo de inclusão de custos virtuais na composição do Custo Logístico Genérico – Custo Logístico Total; a subseção 2.1.2 apresenta uma abordagem sobre algoritmos genéticos e, em seguida, a subseção 2.1.3 elucida o tema de Simulação e Sistemas dinâmicos; por fim, a subseção 2.1.4 trata das análises multicritérios e a subseção 2.1.5 versa sobre a técnica de Otimização Linear Multiobjetivo (OLM), incluindo os métodos de resolução de tais tipos de problemas.

Uma pesquisa relativa aos atuais sistemas logísticos de graneis sólidos no Brasil, bem como a evolução da atual matriz logística nacional e sobre a evolução dos seus conceitos de logística reversa no Brasil foram detalhadas do Apêndice A ao C.

Tabela 2-1 – Resumo da Revisão Bibliográfica – Artigos consultados

Autores	Modelagem	Aplicação
Soncim (2002)	Otimização Linear	Análise e seleção de alternativas mais adequadas no transporte de carga sobre área de influência de um corredor de exportação de um produto mineral
Pinheiro and Marujo (2012)	Programação Linear (LP) e Programação Linear Inteira Mista (PLIM).	Fluxos otimizados das rotas intermodais pré-estabelecidas no escoamento da soja, com origem única na cidade de Sorriso-MT com destino aos 6 principais portos de exportação de soja, Definição da config. de redes de transp., baseado em decisões de seleção do tipo e localiz. de instal. (fábricas ou armazéns), bem como a definição dos modos de transp. entre múltiplas origens e múltiplos destinos (fábricas, armazéns, clientes), além do respectivo fluxo de produtos (tipo e quantidade de cada), além de decisões de investimento em equip. e decisões operacionais de acordo com infraest. disponível (capacidades) e políticas de transp.
Sadegheh et al. (2010)	Programação Inteira Mista (PIM).	Desenho multinível de rede de sistema logístico multimodal, com múltiplas origens (fornecedores) múltiplos produtos e componentes. O modelo multimodal utilizado pelos autores assim, alcança um nível mais estratégico de tomada de decisão, pois leva ainda em consideração fatores econômicos, ambientais e de risco.
Kabadurmus and Erdogan (2020)	Programação Inteira Mista (PIM).	
Zhang et al. (2017)	Otimiz. com Algor. Genét., que utiliza uma metodologia de codif., cruzamento e mutação para analisar as diversas combinações de modos de transp. possíveis	Selecionar as combinações de modos de transporte (sistema logístico multimodal) entre múltiplas origens e destinos, de forma otimizada
Lee et al. (2012)	Simulações Sistemas Dinâmicos	Análises de viabilidade de uso de transporte urbano de pessoas com bicicletas públicas em relação aos modos de transporte tradicionais, desdobrada em um horizonte de 84 meses, Desenho de redes, compostas por quatro camadas (fábricas, depósitos centrais, depósitos regionais e clientes (pontos de demanda)) que abrangem decisões de localização de instalações, de armazenagem, de transporte e de estoque redes de distribuição
Ambrosino e Scutellà (2005)	Sistemas Dinâmicos Programação linear Inteira Mista (PLIM).	Escoamento da soja no Mato Grosso até seus respectivos portos de exportação
Ferrari (2006)	programação linear inteira mista (PLIM),	estudo de caso de empresa do segmento eletrônico (linha marrom) com produção em Manaus.
Amaral et al. (2012)	MCDA (<i>Multi-Criteria Decision Analysis</i>)	
Eskandarpour et al. (2015)	Otimização Multiobjetiva -revisão bibliográfica estruturada	Estudo de desenho de sistemas logísticos sustentáveis
Pinto-Varela et al. (2011)	Otimização Multiobjetiva -Simetric Fuzzy Linear Programming (SFLP)	Desenvolver uma formulação genérica para o projeto e planejamento de cadeias de suprimentos, considerando simultaneamente econômicos e ambientais.
Chaabane et al. (2012)	Otimização Multiobjetiva linear (PMOL)	Desenho de redes em sistemas logísticos sustentáveis para a cadeia de produção do alumínio, composta por múltiplas origens, destinos, fornecedores, além de centros de distribuição.
Mohebalizadehgashti et al. (2020)	Otimização Multiobjetiva de programação linear mista-inteira	Multi-período, multi-produto, rede de cadeia de suprimentos de carne verde multi-escala.
Perá (2022)	Otimização Multiobjetiva pela ótica do Green Supply Chain – GSC	Escoamento da soja brasileira
Azuma (2011)	Métodos de resolução de Otimização Multiobjetiva	Pesquisa bibliográfica de métodos de resolução
Oliveira (2020)		

(Continua)

(Conclusão)

Autores	Objetivo	Parâmetros, considerações e principais variáveis
Sonicim (2002)	O objetivo do algoritmo de custos mínimo e determinar os caminhos dos fluxos que minimizam o Custo Generalizado Total do sistema logístico multimodal capacitado Custo Generalizado, que incluem além do Custo Logístico (Frete de transferência e transbordo), o Custo Virtual do Tempos de Viagem (CVTV), em transito e dos Custos Virtuais dos Tempos de Transferência (CVTT), que variam conforme o custo de oportunidade do capital considerado.	O custo da tonelada do produto no local (colheita, produção, extração, etc.);Custo da Ton./km ao longo das estradas vicinais; Custo da Ton./km na rodovia-tronco; Custo de oper. do term., por ton. do produto; Custo da Ton./km ao longo da ferrovia PT; extensão em quilômetros, da ferrovia PT; Custo oper. do porto, por ton.; preço de exportação, ou preço, a nível de mercado internacional, da toneliada do produto, colocada no navio,
Pinheiro and Marujo (2012)	Minimizar de custos de transporte de uma rede multimodal definidos o número de origens, de locais intermediários (os hubs), e locais de destino. Encontrar as seguintes frequências: $P_{i,j,m}$ – Frequência de serviço na conexão (i,j) utilizando modo m; $Q_{j,k,m}$ – Frequência de serviço na conexão (j,k) utilizando modo m;	Custo por un. de transp. na conexão utilizando modo m; –Custo por un. de transp. na conexão utilizando modo –Cap. Máx da un. de serv. da conexão utilizando modo m; Cap. Máx. da un. de serv. da conexão utilizando modo; Cap. de estoc. do local intermediária; Quantid. de grãos transf. por un. na conexão utilizando modo - Quantid. de grãos transferidos por unidade na conexão utilizando modo m, – Dem. no porto dest;
Sadegheh et al. (2010)	Minimizar o custo logístico total "virtual". O CLT Virtual é composto pela soma tória dos custos de produção, transporte, oportunidade e custos de emissões de carbono. O primeiro refere-se ao preço por unidade de produtos encaminhados às fábricas. Os Custos de Transporte Fixo envolvem despesas (por exemplo, custos de manuseio) que nunca são alteradas, não importa quantos produtos são entregues das fábricas; enquanto o Custos de transporte variável conforme o volume do produto (por exemplo, custos crescentes de combustível). Os custos de oportunidade significam que a despesas calculadas quando as outras melhores escolhas passaram pela tomada de decisão processo. O último componente da função objetivo são incorridos pela compra de créditos de emissões de carbono.	Além da composição dos Custos Logístico Total Virtual as Variáveis inteiras, dada pelo fluxo determinado de produto no segmento considerados e uso de variáveis binárias para auxílio na tomada de decisões de abertura e fechamento de fabricas, número de produtos tipos de transporte e investimentos.
Kabadurmus and Erdogan (2020)	Minimizar o Custos Logísticos Totais Virtuais (CLTV) utiliza parâmetros de transformação das emissões de CO2 em valores monetários - custos de emissões, baseados no sistema Cape and Trade do mercado global de CO2 e ainda considera fatores de riscos dos fornecedores. Os diferentes custos, emissões e riscos dos transportes multimodais e para as configurações das restrições foi considerado os limites aceitáveis de riscos dos fornecedores na Supply Chain, além de analisar a influência de diferentes preços de emissões de CO2 sobre o desempenho do sistema logístico.	Variáveis de decisão: A quantidade de emissão comprada de outras empresas A quantidade de emissão vendida para outras empresas O número de unidades de produto transportadas através do arco com modo de transporte. O número de veículos/contêineres/aviões usados no arco = $1 \leq Z_i \leq 1$ se o fornecedor/fábrica $i \in S \cup M$ for ativado para o produto $p \in P$, = 0 caso contrário.
Zhang et al. (2017)	Minimizar o CLT custo logístico total, respeitando as restrições capacidade de transporte e de atendimento da demanda com janelas de horário determinadas considerando ainda alguns impactos ambientais. O modelo proposto incorporaculos de emissão de CO2 para determinar as combinações ideais de modos de transporte e seleções de investimento para nós de transferência, que consideram custo de transporte, tempo de transporte, emissão de carbono, e restrições de janela de tempo.	$X_{m-} 0 \leq 1$ variável igual a 1 se as mercadorias são embarcadas pelo modo m das cidades i para i+1; caso contrário, para 0 $Y_{m-} 0 \leq 1$ variável igual a 1 se os bens forem transferidos dos modos m para l na cidade i; caso contrário, para 0 $Z_i- 0 \leq 1$ variável igual a 1 se o investimento for para capacidade de transferência sobre a cidade nó i; caso contrário, igual a 0
Lee et al. (2012)	Uma abordagem dinâmica e multidimensional para a medição da sustentabilidade do PSS, usando combinação de SD e TBL, que fornece um método mais sistemático de integrando as três perspectivas da TBL considerando as inter-relações entre eles ao longo do tempo	Ambiental - Redução do consumo de energia e Redução das emissões de poluição do ar Econômico - Redução do orçamento do governo local Social - Estado de saúde humana
Ambrosino e Scutellà (2005)	Otimização de fluxos em uma malha existente e a otimização da configuração ou desenho da malha definir o número e a localização dos diferentes tipos de instalações para projetar uma nova rede de distribuição ou para melhorar uma rede existente.	Custos de instalação, armazenamento, transporte e estoque e as variações ao longo de um período de tempo. decisões de localização;decisões de alocação; decisões de rotas; decisões de inventário)
Ferrari (2006)	Otimização do fluxo do sistema, de forma a se obter o custo logístico total mínimo além da localização e níveis de estoque para instalação de hubs de armazenagem integrados a um sistema logístico multimodal capacitado	Efeitos da sazonalidade (demanda variável) em múltiplos períodos e custos de implantação de instalações de armazenagem fixas ou ainda investimentos para aumento de capacidade.
Amaral et al. (2012)	Analisar a escolha de diferentes alternativas modais no transporte entre a Zona Franca de Manaus - ZFM e a região sudeste do Brasil	Confiabilidade, capacidade, transit-time, segurança, avarias, flexibilidade, frequências e informação. Nas externalidades foram considerados as emissões de CO2 e acidentes.
Eskandarpour et al. (2015)	Identificar nova tendência nesse tipo de estudo, a inclusão das dimensões sociais e ambientais, além da econômica, na aplicação dos modelos matemáticos.	Análise de Ciclo de vida do produto (LCA), ou, devido à sua complexidade intrínseca, a consideração de indicadores e parâmetros socioambientais
Pinto-Varela et al. (2011)	A maximização dos lucros totais e considerando simultaneamente, a minimização dos impactos ambientais decorrentes desse sistema.	Escolhas tecnológicas (linhas de produção, capacidades de estocagem, tipos de transportes e concepções) com decisões operacionais (níveis de produção, bem como manuseio dos materiais e definição dos fluxos e localização e níveis estocagem de matérias primas e produtos) considerando os impactos ambientais (de consumo de energia e combustível), visando a obtenção de uma lucratividade total máxima.
Chaabane et al. (2012)	O primeiro objetivo é baseado em aspectos econômicos e o segundo em nos impactos ambientaisprimeiro objetivo é baseado em aspectos econômicos e o segundo em nos impactos ambientais	Internalização dos impactos levantados pela análise do ciclo de vida do produto (LCA), que considera as emissões de CO2- GHG, desperdícios (líquido ou sólidos), uso de energia e recuperação de materiais. Diferentes cenários de precificação de carbono equivalente emitido ao longo do tempo para a tomada de decisões estratégicas com fundamentos sustentáveis
Mohebalizadeh gashti et al. (2020)	Desenhar e configurar uma rede multivariada em termos de nível (mais de uma SC), produtos e períodos . Otimizar três objetivos simultaneamente: a minimização do custo total, a minimização das emissões de CO2 relacionadas ao transporte e a maximização da capacidade total das infraestruturas.	Aspectos de incerteza a no modelo matemático proposto, utilizando árvore de decisão para auxílio na solução do problema integrando decisões estratégias e operacionais de forma eficiente economicamente e ambientalmente, segundo os parâmetros considerados.
Perá (2022)	Avaliar os efeitos das mudanças tecnológicas e de infraestrutura do transporte para fomentar uma logística verde para a soja brasileira no longo prazo (2020-2050), de forma a recomendar políticas públicas e privadas para que o país possa contribuir com a descarbonização do setor, redução de custos logísticos e consequente aumento da competitividade do agronegócio. otimização multiobjetivo de fluxos em sistemas logísticos multimodais e com consideração multiperiódico- num horizonte de 2020 a 2050.	Os diferentes impactos de mudanças tecnológicas e infraestruturais nas variáveis de custos, emissões de dióxido de carbono (CO2), perdas nas atividades logísticas, demanda de combustíveis (óleo diesel e combustível), demanda de caminhões e intensidade dos diferentes modos de transporte (rodoviário, ferroviário, hidroviário e marítimo).
Azuma (2011) Oliveira (2020)	Aprofundar pesquisa no método do E restrito - Curvas de Pareto	N.A

As abordagens matemáticas aplicáveis, além dos conceitos e históricos geográficos econômicos e logísticos considerados nessa pesquisa foram detalhados nos Apêndices A á F servem de pano de fundo para o emprego da modelagem linear multiobjetivo aplicada ao estudo de caso de desenho de rede multimodal capacitada em Sistemas Logísticos Sustentáveis (SLS), que será detalhada nas subseções subsequentes.

2.1.1 Otimização linear objetivo

2.1.1.1 Redução do Custo Generalizado (CG), Custo Logístico Total (CLT) e Custo Virtual Tempo

Soncim (2002) desenvolve, a partir de sua pesquisa bibliográfica, uma metodologia para a análise e seleção de alternativas mais adequadas ao transporte de carga sobre área de influência de um corredor de exportação de um produto mineral, considerando diferentes características de carga e capacidades de infraestrutura de transportes sobre uma ótica temporal, contudo, não leva em conta as externalidades geradas pelo sistema logístico obtido.

Pela aplicação do problema do caminho mínimo, essa metodologia utiliza algoritmos que selecionam caminhos em função de uma impedância, escolhidas conforme particularidades do sistema em estudo. O autor aplicou algoritmos de fluxo a custo mínimo para enviar determinado fluxo alvo F , de uma origem O para um destino D , em uma rede genérica R , na qual cada arco (i, j) possui uma capacidade ou limite superior $C_{i,j}$, além de um custo generalizado positivo ($CG_{i,j}$), que pode representar os custos logísticos, os custos de tempos de viagem ou qualquer outra medida, dependendo da aplicação. O objetivo do algoritmo de custo mínimo é determinar os caminhos dos fluxos que minimizam o Custo Generalizado Total do sistema (SONCIM, 2002).

Entretanto, em razão das características do problema, existe uma necessidade de escoamento rápido no caso explorado pelo autor, que passa a considerar uma análise paralela ao custo mínimo, com um fluxo máximo, comparativa dos diferentes tempos entre os modos de transporte distintos, chamada de análise de Custo Generalizado, que inclui, além do Custo Logístico (frete de transferência e transbordo), o Custo Virtual do Tempos de Viagem (CVTV) em trânsito e os Custos Virtuais dos Tempos de Transferência (CVTT), que variam conforme o custo de oportunidade do capital considerado (SONCIM, 2002).

Por meio de uma modelagem da rede de transportes, cria-se uma rede representativa formada por dois nós, i e j , ligada pelos arcos que representam as opções de transporte que os conectam. Cada nó i e j que não é origem ou destino representa um *hub* e, para cada arco, é associado um Custo Generalizado, formado pelo Custo Logístico e pelos Custos Virtuais do Tempo, conforme Figura 2-2.

As considerações de Soncim (2002) foram as seguintes: $CM_{i,j}$, que é a capacidade máxima de carga que podem ser transportadas entre dois nós; $C_{i,j}$, que representa o custo das tarifas de execução do transporte de uma unidade de carga do nó i ao nó j ; e $T_{i,j}$, que corresponde ao tempo de execução das atividades do transporte ou transferência de uma unidade de carga do nó i ao nó j .

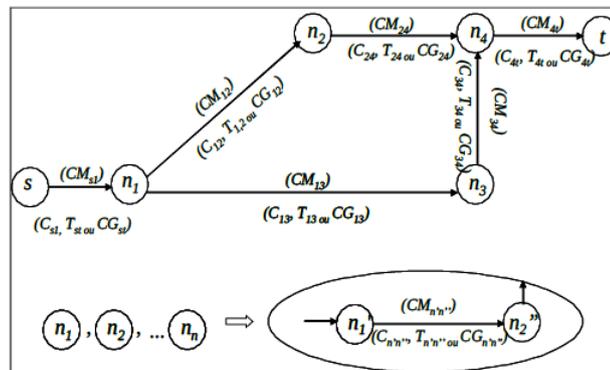


Figura 2-2 – Modelagem rede multimodal de Custo Generalizado.
Fonte: Soncim (2002)

$CG_{i,j}$ é o Custo Generalizado, que analisa o custo $C_{i,j}$ e o custo virtual do tempo de transporte do nó i ao nó j , conjuntamente. Os arcos $(s, 1)$, $(1, 2)$, $(2, 4)$, $(3, 4)$ e $(4, t)$ representam os diferentes modos de transporte (ferrovia, rodovia ou hidrovia) e, associadas a esses arcos, estão as restrições de capacidade $CM_{i,j}$, assim como custo $CG_{i,j}$.

Para essa pesquisa em questão, a metodologia desenvolvida por Soncim (2002) serviu de base para a metodologia desenvolvida no capítulo 4. Ademais, este autor também avalia o desenho de redes capacitadas multimodais, representado pelo desenho da Figura 2-2 que considera a modelagem em redes multimodais em relação aos arcos que representam os diferentes modos de transporte que conecta nodos, constituídos pelas origens, *hubs* intermediários e destinos, restritos pelas respectivas capacidades dos transportes e atendimento da demanda e com diferentes custos logísticos. Porém, devido a diferentes dinâmicas dos estoques (giro de estoques) e custos dos produtos considerados por Soncim (2002), não é representativo, chegando a menos de 0,1% do Custo Logísticos considerado. Uma outra grande

diferença é que nesse caso de Soncim (2002), o autor não considera a questão dos impactos socioambientais, somente o custo generalizado é o fator decisório.

Pinheiro e Marujo (2012) aplicaram um modelo matemático de minimização de custos de transporte em uma rede multimodal e obtiveram os fluxos otimizados das rotas intermodais pré-estabelecidas no escoamento da soja, com origem única na cidade de Sorriso, MT, com destino aos seis principais portos de exportação de soja, também com objetivo de minimizar o CLT.

No entanto, o caso estudado por Pinheiro e Marujo (2012) alcança um nível de decisão mais tático, enquanto Soncim (2002) permite, com a aplicação do modelo, que sejam definidos o número de origens, de locais intermediários (os *hubs*) e locais de destino. As conexões entre origens e *hubs* e *hubs* e portos são feitas por três tipos de transporte – rodoviário, ferroviário e hidroviário – e cada um deles é restringido pelo número máximo de frequências de viagem que podem ser aplicadas ao sistema devido às capacidades de tamanho e carga da frota, além das capacidades de estocagem e movimentação de cada *hub*. Os custos de transporte de cada modo nas conexões entre origem, *hub* e *hub* e destino são conhecidos e incluem os custos de carregamento, estocagem e descarregamento. A consideração dos custos de transbordo também foi utilizada no desenvolvimento dessa pesquisa.

A execução do modelo contou com o uso de um *software* de otimização GUSEK, que permite o desenvolvimento para modelos de Programação Linear (PL) e Programação Linear Inteira Mista (PLIM). As respostas obtidas pelo modelo são os modos de transporte indicados em cada conexão, a quantidade de carga para esse meio de transporte e a frequência ideal a ser adotada. Dessa forma, o modelo fornece bases de dados para compor a análise do custo total da utilização de rotas para o escoamento da soja a partir de uma origem, a cidade de Sorriso.

2.1.1.2 Redução do Custo Generalizado – Custo (Logístico Total e Externalidades)

Sadegheh et al. (2010) propõem um guia de tomada de decisões com uma abordagem em nível estratégico/tático para a definição da configuração de redes de transporte, pautado em decisões de seleção do tipo e localização de instalações (fábricas ou armazéns), bem como a definição dos modos de transporte entre múltiplas origens e destinos (fábricas, armazéns, clientes), além do respectivo fluxo de produtos (tipo e quantidade de cada). As soluções podem ser encontradas com o desenvolvimento de um modelo de otimização baseado em Programação Inteira Mista (PIM).

Os autores ressaltam a importância dessas decisões sobre os modos de transporte, que envolvem as definições de tamanho de pedidos, impactam em escolhas de localização de armazéns com determinação dos níveis de inventário. Dessa maneira, os custos logísticos são componentes significantes na composição do custo total do produto e a eficiência logística passa a ser uma vantagem competitiva de fundamental importância para a sobrevivência da empresa no mercado. Essa eficiência na determinação dos modos de transporte é afetada por decisões de investimento em equipamentos e decisões operacionais, de acordo com a infraestrutura disponível (capacidades) e políticas de transporte (SADEGHEH et al., 2010).

De acordo com Sadegheh et al. (2010), em razão da crescente importância dos aspectos relacionados com a *Green Supply Chain* (GSC) e da necessidade do cumprimento de novas regulamentações e legislações, o custo de emissões de CO_2 deve estar incluído na composição do custo total do produto e considerado no modelo de otimização, que visa obter custo total mínimo, sendo, portanto, uma solução provida de um custo eficiente e ecologicamente amigável. Porém, esse fator monetário é um custo virtual, assim como o CVTV e o CVTT considerados por Soncim (2002), não devendo ser contabilizado no custo real do produto.

Logo, o único objetivo do modelo é minimizar o custo logístico total “virtual”, que é composto por custos de produção, custo fixo das fábricas, custos fixos e variáveis de transporte e custos de oportunidade, que consideram o diferente tempo de entrega entre os modos de transporte, resultantes de níveis de estoque variados, como feito por Soncim (2002), adicionado aos custos de emissão de CO_2 . As restrições do modelo são as demandas que devem ser atendidas, as capacidades e os fluxos de materiais que devem ser respeitados.

Variáveis binárias são utilizadas para determinação de abertura ou fechamento e tipo das instalações e variáveis inteiras para determinar a quantidade dos fluxos de cada produto e o custo logístico total. Nesse sentido, Sadegheh et al. (2010) avaliam as mudanças nos resultados obtidos das decisões envolvidas, como a configuração da rede obtida pelo modelo, de acordo com uma análise de sensibilidade com variações do custo de emissões de CO_2 , decorrentes de possíveis aumentos ocasionados por taxações ou novas regulamentações.

Kabadurmus e Erdogan (2020) também fizeram uso de modelagem de Programação Inteira Mista (PIM) para um problema de desenho multinível de rede de sistema logístico multimodal, com múltiplas origens (fornecedores), produtos e componentes. O modelo multimodal adotado pelos autores alcança um nível mais estratégico de tomada de decisão, pois

considera fatores econômicos, ambientais e de risco, porém converte os fatores numa mesma base monetária, diferentemente da metodologia multiobjetivo adotada nesse estudo.

Com a finalidade do cálculo da função objetivo – a minimização dos Custos Logísticos Totais Virtuais (CLTV) utiliza parâmetros de transformação das emissões de CO_2 em valores monetários – custos de emissões baseados no sistema *Cape and Trade* do mercado global de CO_2 . O modelo avalia os diferentes custos, emissões e riscos dos transportes multimodais e, para as configurações das restrições, foram considerados os limites aceitáveis de riscos dos fornecedores na *Supply Chain* e a influência de diferentes preços de emissões de CO_2 sobre o desempenho do sistema logístico também foi analisada.

Os autores afirmam que a maioria dos estudos de desenho de sistemas logísticos sustentáveis considera as emissões de carbono um fator de custo na função objetivo, citando diversos estudos relacionados à abordagem de monetarização das emissões de CO_2 , contudo, ainda não havia pesquisas que considerassem a questão da confiabilidade (risco) do fornecimento (KABADURMUS; ERDOGAN, 2020).

Segundo Kabadurmus e Erdogan (2020), a multimodalidade é uma tendência global nas empresas que visam integração geográfica dos sistemas com redução dos custos logísticos e decorrentes impactos ambientais, mas conforme declarações de Waltho et al. (2019), ainda não são muito comuns, na área acadêmica, estudos de multimodalidade, o que sugere oportunidades para desenvolvimento de estudos de modelagem matemática que integrem o tema de multimodalidade no desenho e planejamento de sistemas logísticos, sob a ótica das esferas da sustentabilidade.

2.1.2 Algoritmos genéticos

Zhang et al. (2017) também consideram o custo de emissões de CO_2 na composição do custo logístico total a ser minimizado para o desenho de uma rede multimodal, mas seu modelo pondera restrições de entregas com janelas de tempo.

Os autores classificam os artigos de desenho de sistemas logísticos pesquisados de acordo com os contextos e abrangência envolvida na modelagem, classificados em desenho de redes de *Supply Chain*, regionais ou desenho de redes logísticas verdes. Os desenhos de rede de *Supply Chain* e os regionais focam na modelagem voltada para a configuração dos melhores nodos, com o objetivo de melhorar a eficiência logística do sistema com a minimização do custo logístico total. Os desenhos de redes logísticas verdes, por sua vez, têm como foco da

modelagem a melhoria da eficiência do serviço logístico, com a redução dos custos totais e das externalidades, buscando alcançar um balanço sustentável entre economia, meio ambiente e objetivos sociais (ZHANG et al., 2017).

No caso estudado por Zhang et al. (2017), a intenção foi selecionar as combinações de modos de transporte (sistema logístico multimodal) entre múltiplas origens e destinos, de forma otimizada, ou seja, com um custo logístico total mínimo, respeitando as restrições da capacidade de transporte e de atendimento da demanda com janelas de horário determinadas.

O modelo também considera diferentes custos, emissões e tempos entre os modos de transporte, com seus respectivos transbordos. Devido à sua robustez e natureza evolucionária, atribuídas pela consideração restritiva do atendimento das janelas temporais e análise de possíveis combinações dos modos de transporte, os autores fizeram uso de três algoritmos diferentes para solução do problema proposto e compararam seus resultados: o algoritmo genético utiliza uma metodologia de codificação, cruzamento e mutação para analisar as diversas combinações de modos de transporte possíveis; o algoritmo heurístico, preliminarmente, busca o caminho mais curto, respeitando as restrições de atendimento de tempo e capacidades, fazendo ajustes entre os pares de cidades; o pacote CPLEX solver não conseguiu encontrar nenhuma solução em razão da complexidade do problema (ZHANG et al., 2017).

De acordo com os resultados numéricos obtidos, o método mais eficiente para esse caso estudado pelo autor foi o algoritmo genético; este, contudo, não se aplicaria para a pesquisa que está sendo proposta em razão de sua robustez e complexidade causada pelo grande número de variáveis para modelar múltiplas origens e destinos além das janelas temporais.

2.1.3 Simulação e sistemas dinâmicos

Schriber (1991) entende que a simulação envolve a modelagem de um processo (sistema), de tal forma que imite as respostas do sistema real em uma sucessão de eventos que ocorrem ao longo do tempo. Nesse sentido, de acordo com Ceciliano (2007), em razão dos comportamentos sistêmicos e estocásticos intrínsecos da cadeia produtiva do minério de ferro, da evolução das ferramentas de Tecnologia de Informação e do avanço das técnicas de Pesquisa Operacional, houve aumento da procura por soluções integradas com aplicação de programação matemática envolvendo o uso de modelos probabilísticos, simulações e otimizações, que visam também o dimensionamento otimizado de recursos, auxiliando na análise de custos logísticos e

nível de serviço, e na determinação dos gargalos do sistema e análise de viabilidade econômica de investimentos em projetos de aumento de capacidade do sistema (gargalos), em conformidade com cenários preestabelecidos.

Dessa maneira, as simulações e análises de sistemas dinâmicos são métodos que podem ser empregados para avaliar redes em sistemas de transportes multiperíodos, isto é, ao longo do tempo. Geralmente, quando envolvem investimentos e decorrentes análises de viabilidade econômica de projetos com fluxos de caixa, ou quando as variáveis não são constantes ao longo do tempo, ou ainda quando forem dependentes entre si, tais metodologias são utilizadas para auxiliar na tomada de decisões estratégicas.

Autores como Lee et al. (2012) e, mais recentemente, Suryani et al. (2016) e Wang e Gunasekaran (2017) aplicaram a análise de sistemas dinâmicos para contemplar os efeitos positivos e negativos – externalidades, tendo em vista o desenho e planejamento de sistemas logísticos multimodais, com fluxos otimizados. Esses impactos, sob a ótica das três esferas do *Triple Bottom Line* (TBL), têm caráter multidimensional e dinâmico ao longo do tempo.

De modo mais específico, Lee et al. (2012) utilizaram análises de viabilidade de uso de transporte urbano de pessoas com bicicletas públicas em relação aos modos de transporte tradicionais, desdobrada em um horizonte de 84 meses, conforme ilustrado pela Figura 2-3. É possível notar como os parâmetros levantados relacionam-se entre si ao longo do tempo estabelecido.



Figura 2-3 – Análise de sistemas dinâmicos sob a ótica dos TBL
Fonte: Lee et al. (2012)

Ambrosino e Scutellà (2005) analisaram diferentes problemas relacionados ao desenho de redes, que abrangem decisões de localização de instalações, armazenagem, transporte e estoque. Segundo as autoras, há dois tipos de problema principais: a otimização de fluxos em uma malha existente e a otimização da configuração ou desenho da malha. Alguns cenários realistas foram investigados e versões dinâmicas também foram discutidas, nas quais uma rede de distribuição é analisada sob determinado horizonte de tempo, ao invés de em um período fixo. Dois tipos de formulações de programação matemática foram propostos: algumas formulações estendem modelos clássicos de localização e outras se baseiam em variáveis e restrições de fluxo.

Ferrari (2006) avaliou a localização e níveis de estoque para instalação de *hubs* de armazenagem integrados a um sistema logístico multimodal capacitado, a fim de melhorar o sistema logístico de escoamento da soja no Mato Grosso até seus respectivos portos de exportação. O modelo proposto, de nível estratégico, também foi resolvido com uma formulação de programação linear inteira mista, como no artigo de Ambrosino e Scutellà (2005).

De modo mais específico, o problema de localização pode ser compreendido como um refinamento do problema de transporte, no qual foi associada a variável do tipo binária para a escolha do local, da capacidade e consequente otimização do fluxo do sistema, de forma a obter o custo logístico total mínimo. O modelo também considera os efeitos da sazonalidade (demanda variável) em múltiplos períodos e custos de implantação de instalações de armazenagem fixas, e investimentos para aumento de capacidade.

2.1.4 Análises Multicriteriais (MCDA)/Análise Hierárquica de Processos (AHP)

Amaral et al. (2012) aplicam a metodologia *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA) utilizando a técnica SMART, ou *Simple Multi-Attribute Rating Technique*, para a escolha do modo de transporte entre uma origem e um destino. Essa técnica quantifica a importância de cada variável em uma função utilidade que representa, no caso em estudo, os três aspectos – custos logísticos, benefícios intrínsecos e externalidades.

A determinação do grau de importância compreende a opinião de especialistas e *stakeholders* envolvidos no processo, obtidas por meio de entrevistas e pesquisas comparativas para definir o peso de cada aspecto sobre uma visão geral, gerando base teórica para tomada de decisão em problemas complexos. Dentre os benefícios foram considerados os atributos

aplicáveis a viagens longas, entre eles o de confiabilidade, capacidade, *transit-time*, segurança, avarias, flexibilidade, frequências e informação. Nas externalidades foram considerados as emissões de CO_2 e acidentes.

Devido à subjetividade no julgamento da importância dos aspectos implicados no problema, bem como o aumento de complexidade para aplicação em redes com múltiplos destinos, métodos como MCDA utilizados em conjunto com outras técnicas, como o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) (FREEMAN; CHEN, 2015), *Balanced Scorecard* (BSC) (ALIAKBARI NOURI et al., 2019) ou *Fuzzy Analytic Hierarchy Process* (FAHP) (GALANKASHI et al., 2015), que consideram incertezas, não se enquadrariam na solução do problema a ser tratado neste estudo, que fará uso da metodologia de Otimização Linear Multiobjetivo (OLM) descrita na próxima subseção.

2.1.5 Otimização Linear Multiobjetivo (OLM)

Eskandarpour et al. (2015) apresentaram uma revisão bibliográfica estruturada que analisa 87 artigos relacionados ao desenho de redes em Sistemas Logísticos, denominados *Supply Chain Network Design* (SCND), e identificaram uma nova tendência nesse tipo de estudo: a inclusão das dimensões sociais e ambientais, além da econômica, na aplicação dos modelos matemáticos.

Tal consideração está pautada na Análise de Ciclo de Vida do produto (ACV) ou, devido à sua complexidade intrínseca, na consideração de indicadores e parâmetros socioambientais. Segundo os autores, esses modelos podem ter uma variedade de contextos industriais, com abordagens de simples ou múltiplos períodos, produtos, estruturas do sistema logístico e objetivo, e foram classificados em problemas com um objetivo ou múltiplos, com modelos determinísticos ou estocásticos, que incluem análises que envolvem incertezas e riscos (ESKANDARPOUR et al., (2015).

Os modelos de objetivo único convertem os parâmetros socioambientais em uma mesma base monetária, como por exemplo, o equivalente em valores monetários do total de CO_2 emitido em toneladas. De acordo com a complexidade do contexto analisado, esses modelos podem assumir uma formulação linear ou não linear. O uso de variáveis binárias para a decisão sobre abertura ou fechamento de instalações, em conjunto com variáveis contínuas, pode aumentar a complexidade da formulação, se houver uma relação não linear entre as variáveis e parâmetros utilizados. O uso de restrições não convexas também pode causar não linearidade.

Os modelos multiobjetivos podem ser solucionados, entre outras formas, por meio do uso da metodologia da restrição- ϵ , com a priorização de um objetivo, seguida pela transformação dos demais objetivos em restrições. Para Neto (2011), as soluções obtidas são definidas como fronteiras ótimas de “Pareto” – soluções que não são dominadas por nenhuma outra, ou seja, não é possível melhorar um objetivo sem piorar outro.

Dessa forma, os problemas de desenho de rede de sistemas logísticos sustentáveis são naturalmente transformados em problemas multiobjetivos, que podem apresentar variáveis de decisão de diferentes naturezas (ESKANDARPOUR et al., 2015).

Pinto-Varela et al. (2011) exploram a aplicação de três metodologias sequenciais para o desenho e planejamento de *Supply Chains* – Sistemas Logísticos com a utilização de otimização linear multiobjetivo, visando a maximização dos lucros totais e considerando, simultaneamente, a minimização dos impactos ambientais decorrentes do sistema. A primeira metodologia adotada pelos autores foi a *Resource-Task-Network* (RTN), ou Rede de Tarefas de Recursos, que relaciona, por meio de uma representação gráfica estruturada, todas as atividades do sistema logístico (produção, transporte, estocagem e suprimento) com os respectivos consumos de recursos da *Supply Chain* (financeiros, energéticos ou de fontes naturais não renováveis).

A segunda metodologia empregada pelos autores foi a *Life Cycle Analysis* (LCA), ou Análise do Ciclo de Vida (ACV), que considera todos os impactos gerados pelas atividades relacionadas aos componentes do sistema logístico envolvido no problema proposto. A última metodologia, o *Symmetric Fuzzy Linear Programming* (SFLP), foi aplicada para a resolução do problema bi-objetivo e estabelece um balanço entre os dois objetivos conflitantes: a maximização do lucro e a minimização dos impactos ambientais. As restrições são flexíveis com a introdução do conceito de grau de viabilidade, expresso por meio de uma variável limitada ao intervalo 0 a 1. Essa metodologia permite tratar funções multiobjetivos, como restrições tipo *fuzzy*, em que o fator maximizado na função objetivo é somente potencializar o grau de uma variável de viabilidade. Com essa consideração, é possível resolver um problema complexo com uma metodologia relativamente simples (PINTO-VARELA et al., 2011).

Com o modelo multiobjetivo empregado, Pinto-Varela et al. (2011) conseguem integrar decisões de nível estratégico no desenho da *Supply Chain* envolvendo escolhas tecnológicas (linhas de produção, capacidades de estocagem, tipos de transportes e concessões) com decisões operacionais (níveis de produção, manuseio dos materiais, definição dos fluxos e localização e níveis estocagem de matérias-primas e produtos), tendo em vista os impactos ambientais (de consumo de energia e combustível) e visando à obtenção de uma lucratividade total máxima.

Nessa concepção mais moderna de desenho de redes, em um nível mais estratégico e considerando aspectos ambientais e econômicos, Chaabane et al. (2012) propõem um modelo matemático de desenho de redes em sistemas logísticos sustentáveis para a cadeia de produção do alumínio, composta por múltiplas origens, destinos, fornecedores e centros de distribuição.

A modelagem inclui a internalização dos impactos levantados pela análise do ciclo de vida do produto (ACV), que considera as emissões de CO_2 – GEE, desperdícios (líquidos ou sólidos), uso de energia e recuperação de materiais. Isso permite contemplar decisões integradas, em níveis estratégico e tático, considerando suprimentos, produção, distribuição, diferentes modos de transporte, logística reversa e créditos de carbono, e possibilita estender a modelagem para um modelo de programação multiobjetivo linear (PMOL), sendo que o primeiro objetivo baseia-se em aspectos econômicos e o segundo, nos impactos ambientais. Assim, diferentes cenários podem ser analisados para precificação de carbono equivalente emitido ao longo do tempo para a tomada de decisões estratégicas com fundamentos sustentáveis, que consideram aspectos ambientais dinâmicos, de acordo com novas possíveis políticas ambientais.

Mohebalizadehgashti et al. (2020) também propuseram um modelo matemático multiobjetivo de programação linear mista-inteira para desenhar e configurar uma rede multivariada em termos de nível (mais de uma SC), produtos e períodos. Esse modelo permite a otimização simultânea de três objetivos: a minimização do custo total, a minimização das emissões de CO_2 relacionadas ao transporte e a maximização da capacidade total das infraestruturas. Os resultados obtidos por meio do uso do software LINGO 17 correspondem a um conjunto de soluções ótimas de Pareto, gerando uma base teórica de tomada de decisão que permite avaliar o *trade-off* entre aspectos econômicos, ambientais e de utilização das capacidades instaladas das infraestruturas.

O modelo contempla, ainda, aspectos de incerteza no modelo matemático proposto, utilizando árvore de decisão para auxílio na solução do problema, integrando decisões estratégicas e operacionais de forma eficiente economicamente e ambientalmente, segundo os parâmetros considerados (MOHEBALIZADEHGASHTI et al., 2020).

Pera (2022), em seu recente estudo sobre os efeitos para escoamento da soja brasileira, explora a abordagem multiobjetiva pela ótica do *Green Supply Chain* (GSC), desenvolvendo um método que formula um modelo matemático de otimização multiobjetivo de fluxos em sistemas logísticos multimodais e com consideração multiperíodos – em um horizonte de 2020

a 2050, cria cenários por meio do uso de técnicas de análise de sensibilidade – elasticidade – entre as variáveis propostas no modelo para uma análise em um nível estratégico e dinâmico de longo prazo, e avalia os diferentes impactos de mudanças tecnológicas e infraestruturais nas variáveis de custos, emissões de dióxido de carbono (CO_2), perdas nas atividades logísticas, demanda de combustíveis (óleo diesel e combustível), demanda de caminhões e intensidade dos diferentes modos de transporte (rodoviário, ferroviário, hidroviário e marítimo).

Todos esses autores serviram de base teórica e metodológica para o desenvolvimento da modelagem multiobjetivo aplicada ao problema tratado nesse estudo.

3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVOS

O desenho de um sistema logístico para escoamento de resíduo mineral proposto neste estudo objetiva quebrar um paradigma do mercado: “O transporte de rejeitos para longas distâncias não é viável economicamente”. Devido ao baixo valor agregado dos coprodutos na mineração para serem substituídos por matérias-primas e à alta quantidade de coproduto disponível para essa substituição, um desenho eficiente, otimizado para maximizar o fluxo de coproduto no sistema logístico multimodal capacitado, torna-se fundamental.

De modo geral, o problema-objeto desta dissertação consiste em identificar a melhor conjugação de fluxos de um produto – resíduo mineral – tipo granel sólido – entre uma origem e múltiplos destinos, escoados por um sistema logístico multimodal capacitado, configurado para maximizar os lucros totais. A análise também faz ponderações sobre os demais objetivos de minimização dos impactos socioambientais negativos e maximização dos impactos socioambientais positivos, simultaneamente.

Entretanto, em razão da contrariedade de alguns dos objetivos em questão, propõe-se um modelo matemático de otimização linear multiobjetivo que alinha decisões de nível tático a um nível estratégico, permitindo a comercialização e o uso desse produto a um preço economicamente viável, considerando as externalidades e alinhando objetivos de *marketing* aos de logística, avaliado sob a ótica das três esferas da sustentabilidade (econômica, social e ambiental).

Além do alinhamento entre decisões estratégicas e táticas, o modelo resulta no desenho (configuração) do sistema logístico multimodal ideal para atendimento dessa demanda, ou seja, o modelo determina fluxos otimizados – de quanto de coproduto será encaminhado, por qual sistemas logísticos (modos de transporte/tipos de *hubs*), para tais destinos. Para essa otimização multiobjetivo, o modelo contempla as restrições de atendimento da demanda, as respectivas capacidades de transporte e as questões econômicas (LT máximo), sem descuidar dos respectivos impactos socioambientais decorrentes do fluxo logístico otimizado obtido, realizados por meio de uma análise de *trade off* entre os pilares da sustentabilidade.

No estudo de caso proposto, o problema consiste no desenho de um sistema logístico multimodal de escoamento de, inicialmente, 12 M tons/ano de coproduto da extração do minério de ferro da usina de Brucutu, para serem substituintes de matéria-prima das empresas de construção civil, divididas em três canais de comercialização e localizadas nos principais estados brasileiros, entre eles o canal de clínquer, o de cerâmica vermelha e o canal de empresas

concreteiras, com demandas estimadas conhecidas, totalizando cerca de 560 cidades-destino, agrupadas em 106 mesorregiões.

Os *hubs* do sistema logístico para atingir essas cidades consideradas inicialmente podem ser próprios ou terceirizados, preparados ou não para a movimentação do minério (equipamentos carga/descarga) e estar em diferentes localizações, o que resulta diferentes distâncias das rotas alternativas que compõem o sistema. Assim, indiretamente, além da determinação do fluxo pela configuração do sistema logístico obtida pelo modelo, também é possível avaliar a escolha da localização dos *hubs*, seu dimensionamento e se a operação será própria ou terceirizada.

A Figura 3-1 ilustra como os fluxos podem ser estruturados de acordo com os modos de transporte e alternativas de configuração dos *hubs* que compõem o sistema logístico proposto, que tem como base os corredores logísticos do minério de ferro (BRASIL, 2018a) e são desenhados em conformidade com o tipo de transporte utilizado e tipo de *hub*, próprio ou terceirizado (operador logístico), preparados ou não para a movimentação do minério (equipamentos carga/descarga). Dessa forma, cada configuração analisada possui custos logísticos distintos, já que diferentes tipos de *hubs* e custos de movimentação estão localizados em diversos locais, com seus impactos socioambientais característicos.

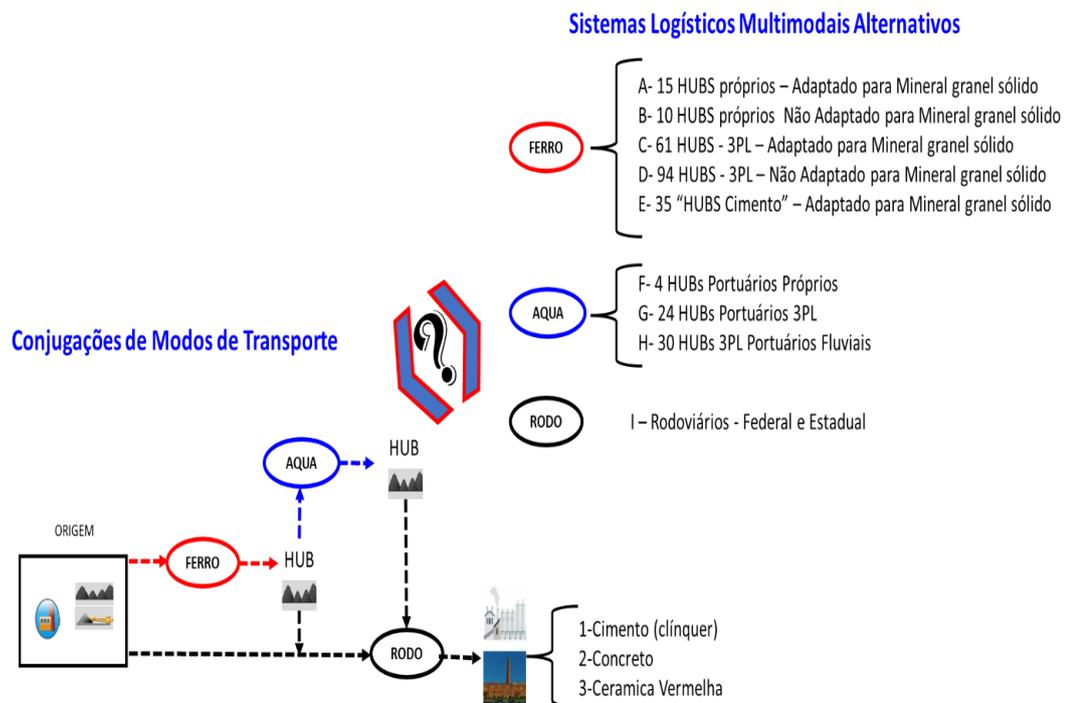


Figura 3-1 – Alternativas dos sistemas logísticos multimodais

Em conformidade com o objetivo deste estudo, para viabilizar a substituição e decorrente escoamento do coproduto obtido, a questão do Custo Logístico, que está diretamente

relacionada à configuração do desenho do sistema logístico, impacta fortemente no lucro do produto.

Particularmente no mercado de mineração, mais especificamente no caso do coproduto do minério de ferro considerado no presente trabalho, os custos de adequação das matérias-primas são reduzidos, uma vez que o produto em questão é um rejeito da extração do minério de ferro. Por outro lado, o preço de venda deve ser baixo, pois precisa ser mais competitivo do que o da matéria-prima a ser substituída – que também é baixo devido às suas características intrínsecas de obtenção e inclui a proximidade entre as reservas minerais de matérias-primas para as indústrias de materiais de construção.

Cada canal de comercialização está disposto geograficamente em diferentes cidades e canais logísticos variados – infraestruturas logísticas –, favorecendo a integração com outros sistemas de transporte multimodais, com custos logísticos, lucros totais e impactos socioambientais distintos, sendo que cada sistema logístico, responsável por suprir cada destino, possui diferentes capacidades restritivas.

Cada coproduto transformado irá atender sua respectiva cadeia e obterá diferente retorno econômico e impacto socioambiental. De acordo com o sistema de transporte utilizado para atendimento de canais variados, dispostos em cada mesorregião, há um custo logístico e respectivos lucros e impactos socioambientais, logo, é preciso um balanceamento de todos os fatores que compõem essa análise de forma holística, buscando uma solução otimizada de maneira “ecoficiente”, conseguindo viabilizar sustentavelmente o encaminhamento de rejeitos de minério para o mercado de construção civil.

Os parâmetros de lucro, custos logísticos e impactos socioambientais positivos e negativos dependem, além do preço de venda, dos modos de transporte obtidos pelo resultado do modelo multiobjetivo, que indica a configuração ótima do desenho de sistema logístico multimodal para o atendimento da demanda estabelecida. Essa configuração peculiar decorre de diferenças entre custos de frete, estoque e de movimentação (de acordo com o tipo de *hubs*). Esses parâmetros dependem ainda da conjugação das distâncias de cada modal e peso, determinadas pelo fluxo logístico e obtidas pelo modelo linear multiobjetivo proposto.

Apesar de restritiva, o compartilhamento da rede de escoamento de minério com seu produto principal, para escoar seus rejeitos minerais de forma ecoficiente, torna-se possível e viável, transformando os rejeitos da mineração em coprodutos, substituintes de materiais de construção. Dessa forma, tal ecoeficiência é obtida com a aplicação da metodologia da

modelagem multiobjetiva para o desenho e planejamento de sistemas logísticos sustentáveis de escoamento do coproduto mineral, descrita no próximo capítulo.

3.1 ESPECIFICAÇÃO DOS DADOS

Esta seção apresenta as considerações sobre o tema e as especificações dos dados. As subseções 3.1.1 e 3.1.2 discorrem sobre o produto (características físicas, químicas e mercadológicas), estimativas e mapeamento de demandas por canal; por seu turno, a subseção seguinte investiga o atual sistema de logístico disponível – mapeamento dos fluxos e corredores logísticos, determinação das distancias reais, capacidades operacionais e respectivos custos logísticos.

3.1.1 Considerações do produto: características físico-químicas do coproduto

Após o processamento de enriquecimento do minério de ferro nas Usinas de Tratamento de Minério (UTM), obtêm-se como resultado três tipos diferentes de produtos, conforme se observa na Figura 3-2:

- a) minério de ferro, principal componente para atender à cadeia das siderúrgicas;
- b) minerais ultrafinos argilosos (MUFA), com cores avermelhadas/alaranjadas e muito finos;
- c) minerais finos arenosos (MFA), com cores brancas acinzentadas.

Suas características físico-químicas e mineralógicas também estão listadas na Figura 3-2; devido a elas, esses minerais podem ser utilizados como substitutos de matérias-primas nas cadeias de construção civil, pois não contém traços de metais pesados e são considerados granel sólido para transporte e armazenamento, muito semelhantes à areia, mas com maior densidade, variando de 2 a 4 t/m³, (EMBRAPII, 2021).

	Caracterização	Uso industrial (entre outros)
	(97%) (2%) Fe ₂ O ₃ ; SiO ₂ Hematita e Quartzo -10+0,150mm e -0,150+0,010mm	Siderurgia (Sinter Feed e Pellet Feed)
	(90%) (9%) SiO ₂ ; Fe ₂ O ₃ Quartzo e Hematita -1+0,150mm e -0,150+0,010mm	Construção Civil - Concreto e Pavimento (agregado - areia fina e muito fina)
	(42%) (35%) (12%) (9%) Fe ₂ O ₃ ; SiO ₂ ; Al ₂ O ₃ ; PPC * Hematita, Quartzo e Caulinita -0,010mm	Construção Civil - Cerâmica e Cimento (argila - baixo teor de Al ₂ O ₃)

Figura 3-2 – Características físico-químicas dos coprodutos do tratamento do minério de ferro
Fonte: Embrapii (2021)

Uma forma alternativa para dispor esse rejeito do minério de ferro, de modo a não representar riscos para o meio ambiente e para a sociedade, e cumprir a nova Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída pela Lei nº 14.066 (BRASIL, 2020), seria a armazenagem em pilhas. Essa estratégia, contudo, não resolve o problema, pois envolve custos para processamento, movimentação e armazenamento. Nesse sentido, considerando as características mercadológicas do Brasil, surge a grande oportunidade: utilizar esse rejeito como substituinte de matéria-prima de recursos não renováveis, devido à alta escala de produção e seu grande impacto econômico/socioambiental no mercado de construção civil, como pode ser observado na Figura 3-3.

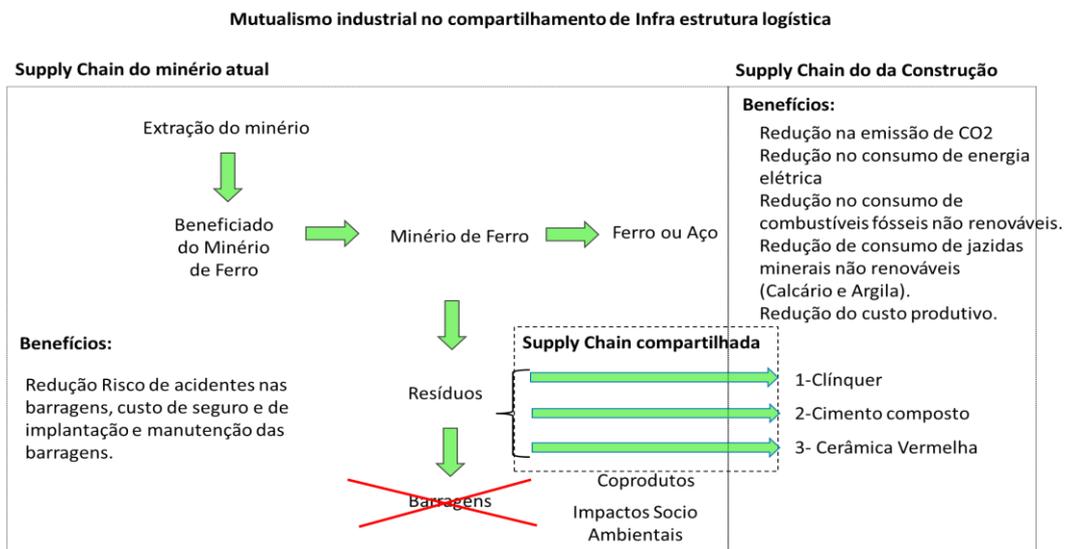


Figura 3-3 – Mutualismo industrial e compartilhamento de Supply Chain

3.1.2 Características mercadológicas do coproduto

3.1.2.1 Localização dos Clientes

Os canais de comercialização do coproduto considerados são os de clínquer, cerâmica vermelha e concreteiras, localizados conforme Apêndice D.

3.1.2.1.1 Clínquer

De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - SNIC (2021), o Brasil possui cerca de 100 fábricas de cimento (clínquer), mas somente cerca de 60 produzem o clínquer, principal subproduto das fábricas de cimento, mapeadas no Apêndice D. As outras 40 empresas produzem somente cimento e utilizam o clínquer como matéria-prima para moer, misturar e fabricar; os demais compostos cimentícios não foram consideradas neste estudo.

3.1.2.1.2 Cerâmica vermelha

O mercado de cerâmica vermelha, constituído, em sua maioria, pelo mercado do segmento de tijolos e telhas, é mais bem distribuído do que o clínquer. De acordo com Brasil (2009), o parque cerâmico brasileiro é constituído por cerca de 5.500 fábricas (com equipamento de extrusão), onde coexistem pequenos empreendimentos familiares, cerâmicas de pequeno e médio porte e empreendimentos de médio e grande porte, responsáveis por um volume anual de 76 bilhões de peças. Todavia, devido à grande informalidade do setor, os números de produção não refletem a realidade, seja no número de empresas ou no número de produção, cuja estimativa é muito maior do que os dados oficiais captados.

Segundo Cabral et al. (2008), trata-se de um setor estruturado de forma assimétrica e pulverizada de capital estritamente nacional, no qual coexistem pequenos empreendimentos familiares (olarias, na maioria, não incorporadas nas estatísticas oficiais), cerâmicas de pequeno e médio porte (com deficiências de mecanização e gestão) e empreendimentos de médio a grande porte (com processos automatizados). Outro fator importante, além da proximidade das jazidas, é a proximidade dos mercados, fator condicionante favorável à constituição de aglomerados produtivos minero-cerâmicos.

Em razão do baixo valor agregado da argila, as minas operam de maneira cativa ou abastecem mercados locais, sendo assim, as fábricas de cerâmica localizam-se próximas às minas e estas, às reservas de argila. As principais reservas concentram-se em quatro estados brasileiros, São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Santa Catarina, que correspondem a,

aproximadamente, 70% da reserva nacional e têm, em todo o território nacional, cerca de 400 minas de argila oficiais, localizadas em 221 cidades (BRASIL, 2007).

3.1.2.1.3 Empresas de concretagem

De acordo com informações da Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem (ABESC, 2021), esse mercado é mais pulverizado com relação aos outros canais. Nesse canal, foram identificados 24 grandes grupos que possuem certificação na Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, suas fábricas estão localizadas em 365 cidades.

Considerando seus três canais, o mercado de materiais de construção está concentrado em determinadas localidades, tanto no litoral quanto no interior, nas regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste, onde encontra-se grande parte da população, da renda brasileira e do consumo desses materiais.

3.1.3 Características do sistema logístico utilizado

Conforme abordado na subseção anterior, este estudo considerou, inicialmente, o escoamento de 12 Mt/ano de rejeitos tipo MUFA, provenientes de uma Usina de Tratamento de Minério (UTM) localizada na região de Brucutu (MG). Esse coproduto abastecerá, semanalmente, o mercado de materiais de construção civil, ao invés de ser processado e armazenado em pilhas, ou destinado para as “perigosas” barragens.

Com base nas informações dos Apêndices A e B, os modos indicados para o transporte de produtos a granel considerados nesta pesquisa foram o rodoviário, ferroviário e aquaviário (fluvial ou cabotagem), além de algumas possíveis integrações. As alternativas propostas são variações entre respectivas inter-relações, que estão esquematizadas na Figura 3-4.

O modo de transporte por dutos, também utilizado para o transporte de minérios, não foi avaliado em razão da falta de infraestrutura disponível, da baixa aderência às características físicas para o seu uso e da alta necessidade de investimento. Nesse sentido, o modo aéreo também não é adequado para esse tipo de produto de alto volume e baixo valor agregado.

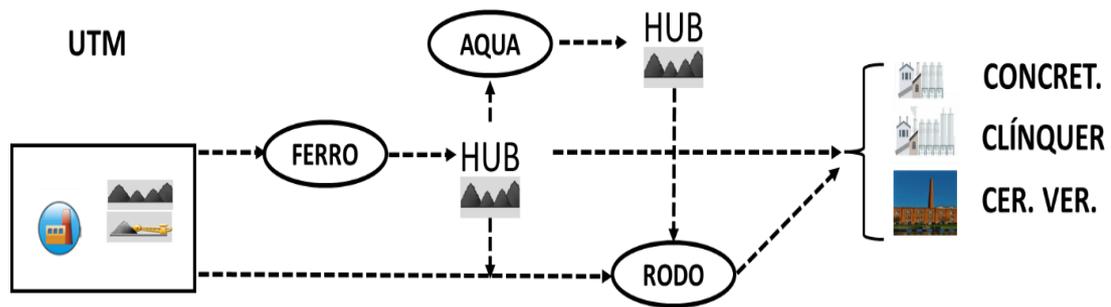


Figura 3-4 – Conexões do sistema logístico multimodal

O ponto de origem foi considerado único: a usina de Brucutu, do complexo ferrífero das Minas Centrais, localizado em uma região central, conforme se observa na Figura 3-5.

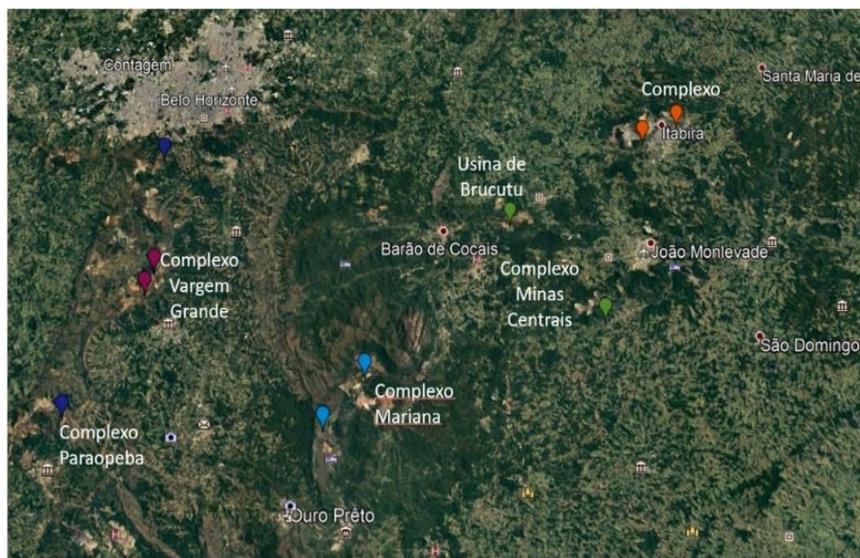


Figura 3-5 – Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais – Brasil
Fonte: Adaptado de Google Earth (2021)

3.1.3.1 Fluxos e corredores logísticos

No que se refere ao estudo ora desenvolvido, em consonância com o Apêndice C e com a conceituação de Leite (2003), trata-se de um canal de logística reversa pós-consumo, pois o “consumo” do minério ferro nas minas durante o processo de extração e beneficiamento gerou o rejeito, que chegou ao fim da sua vida útil e seria disposto em barragens, por meio de um processo que se enquadraria no conceito de “desmanche” do rejeito mineral, separando-o por tipo e tamanho. No entanto, neste caso em particular, contrariando o entendimento do autor, a logística reversa de pós-consumo do reaproveitamento do rejeito como matéria-prima ocorreria em cadeias distintas, e não nela própria.

O sistema logístico “reverso” é um meio para viabilizar economicamente as cadeias reversas, de forma a contribuir para a promoção da sustentabilidade de uma cadeia produtiva (MARCONDES; CARDOSO, 2005). Dessa maneira, o desejo de aplicação de um sistema estruturado de logística reversa revela uma visão ampliada de responsabilidade sobre todo o ciclo de vida do produto e não somente durante sua vida útil, importando para os impactos ambientais, para as possibilidades de desenvolvimento de atividades econômicas e para o comprometimento com o futuro da sociedade.

Segundo Caixeta Filho e Martins (2001), a integração entre os canais diretos e reversos é um ponto relevante sobre a conceituação dos canais reversos. Nesse sentido, o presente estudo possibilitará essa integração por meio do compartilhamento dos canais de escoamento do minério de ferro com os coprodutos, para atendimento dessa demanda em potencial, levando em conta atuais restrições de capacidade de transporte, movimentação e armazenagem.

O novo sistema logístico desenvolvido dos coprodutos irá compartilhar as estruturas da mesma cadeia direta do produto principal, o minério de ferro, até chegar aos respectivos clientes do mercado de construção civil. Todavia, a fim de simplificar o modelo, o fluxo do produto principal da cadeia (de minério de ferro) será desconsiderado e as considerações recairão sobre as capacidades ociosas de cada terminal e linha, como capacidades restritivas do sistema logístico.

Sob a mesma ótica da conclusão proposta de Novaes (2004), que aborda a logística reversa como um novo canal direto da Logística, este projeto trata basicamente da criação de um novo canal para um produto, a partir de estruturas já existentes.

De acordo com a Figura 3-6, para atendimento da demanda de cidades da região Centro-Oeste e Nordeste, alguns possíveis corredores logísticos formados pela integração de um ou mais modais de transporte, da usina de Brucutu para cada destino, foram avaliados, ou seja, o modo rodoviário puro será comparado com o sistema de transporte ferroviário, que é composto pela integração da malha ferroviária da Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM) com a Ferrovia Centro-Atlântica (FCA).

Ademais, também foram comparados o corredor multimodal formado pela integração da malha ferroviária da FCA com o *hub* de Pirapora, utilizando a hidrovia do São Francisco, e o corredor multimodal, que integra o sistema ferroviário no porto de Aracruz (ES), com o corredor de cabotagem a outro porto de destino qualquer, podendo alcançar destino final com uma última integração com o modo rodoviário.

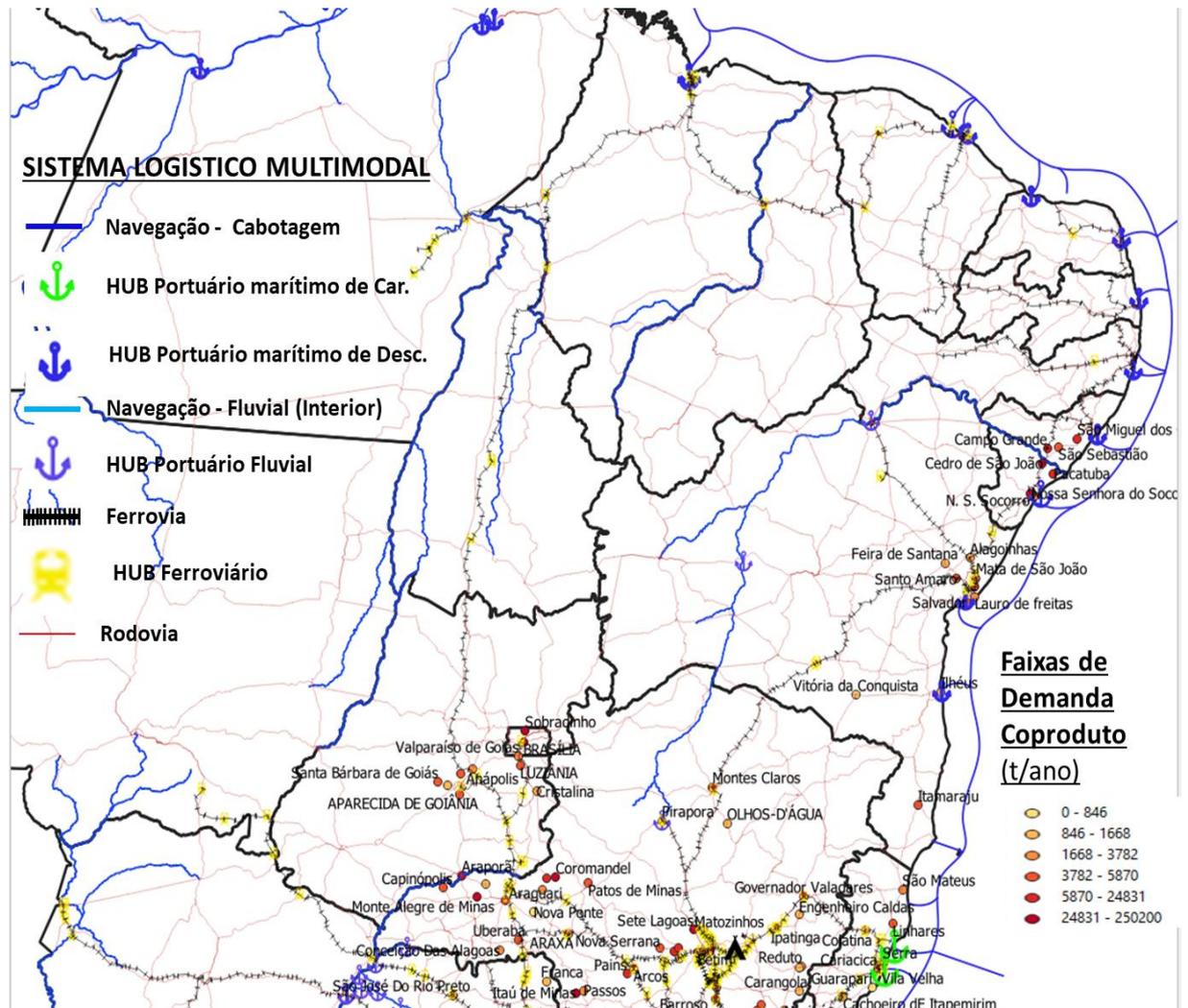


Figura 3-6 – Corredores do Sistema Logístico – Regiões Norte e Nordeste
Fonte: Adaptado de Brasil (2021a) e QGIS (2020)

Na Figura 3-7 estão mapeadas as alternativas dos corredores logísticos para os estados das regiões Sul e Sudeste. Nota-se o modo rodoviário puro, com o modo ferroviário, formado pela integração ferroviária com a malha da MRS e com o aquaviário por cabotagem em Itaguaí, conectado a Brucutu por um trecho ferroviário pela MRS, e outra alternativa: a navegação fluvial pela hidrovía do rio Tietê-Paraná, conectado a uma integração com o sistema rodoferroviário até Uberaba pela FCA e rodovias MG-427 e MG-255.

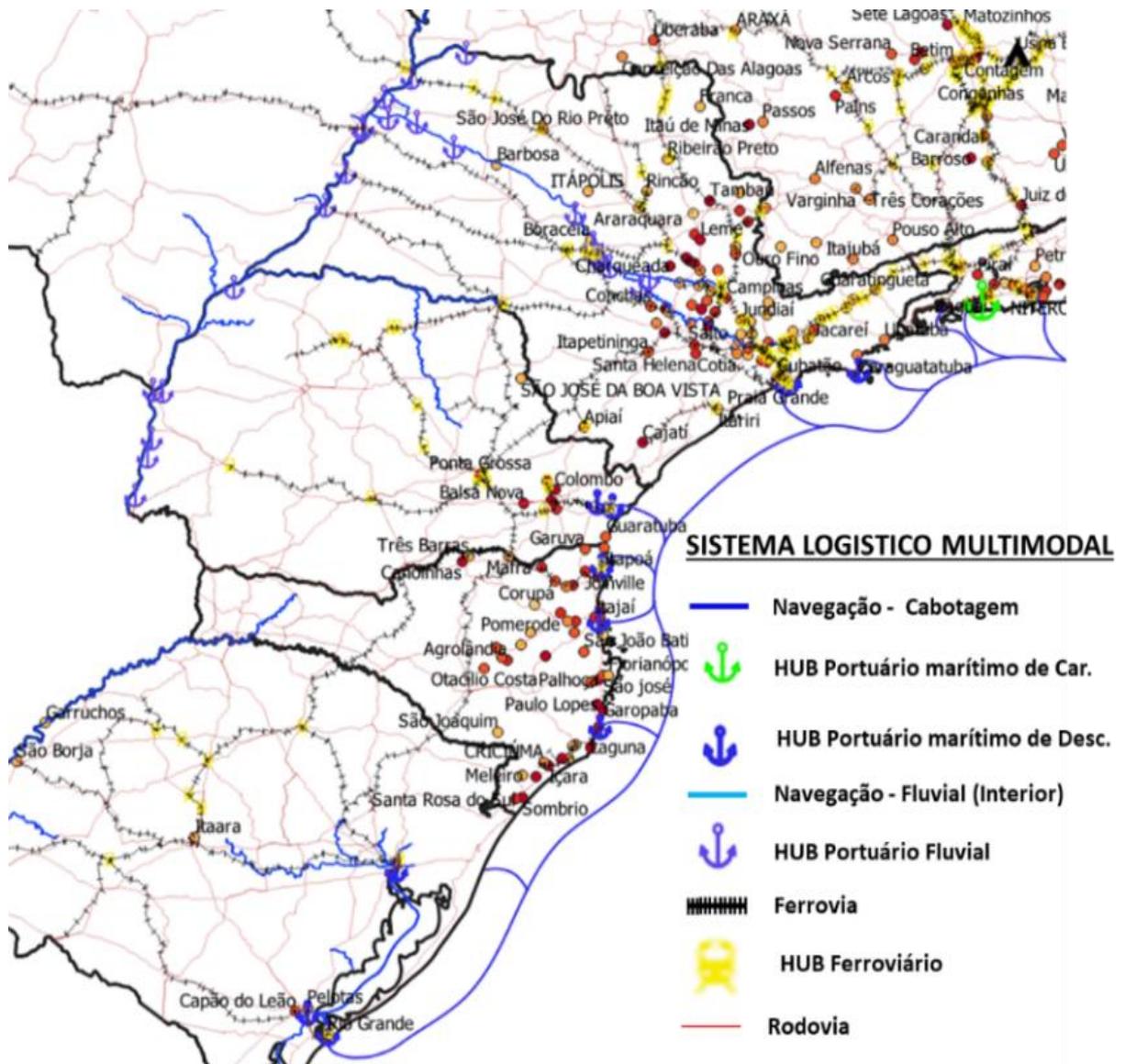


Figura 3-7 – Corredores do Sistema Logístico – Regiões Sudeste e Sul
 Fonte: Adaptado de Brasil (2021a) e QGIS (2020)

Os corredores do sistema logístico brasileiro, mapeados na Figura 3-8, foram convertidos nos fluxos propostos dos sistemas logísticos ilustrados pela Figura 3-9, para serem, posteriormente, avaliados quanto aos custos logísticos e capacidades, por meio da análise da declaração de rede da ANTT (2022), demonstrada nos Apêndices E e F.

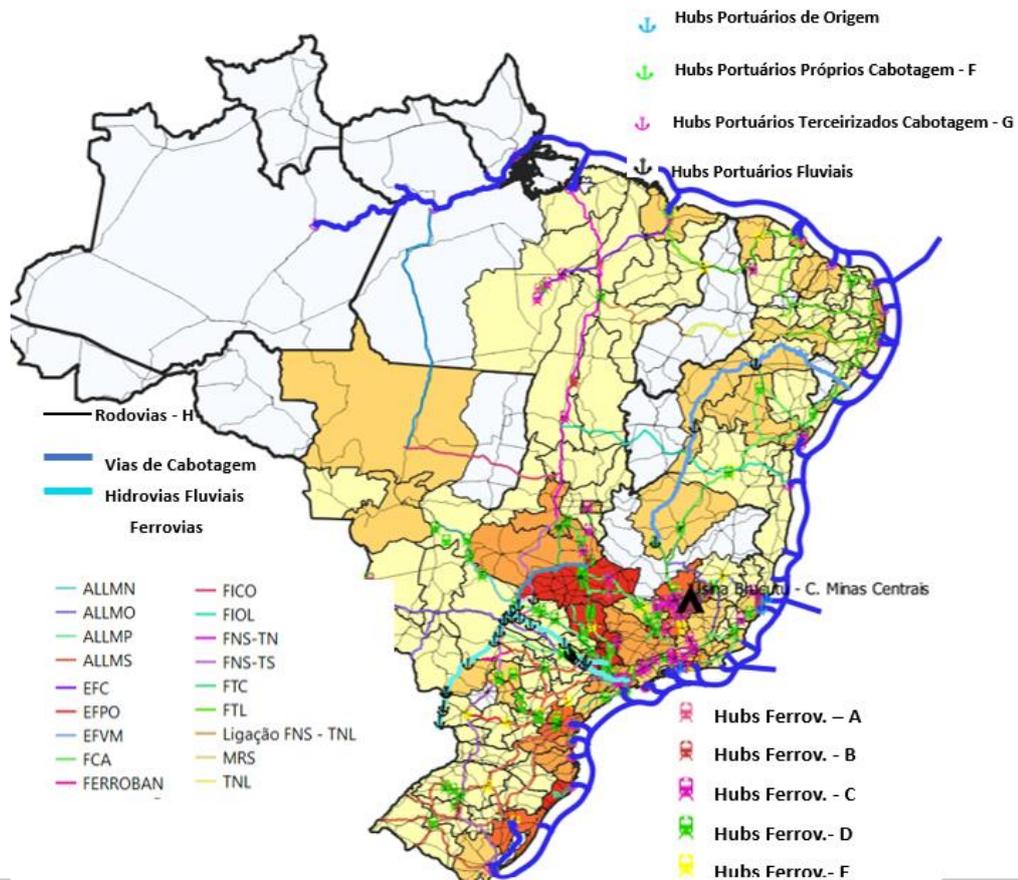


Figura 3-8 – Corredores do Sistema Logístico
 Fonte: Adaptado de Brasil (2021a) e QGIS (2020)

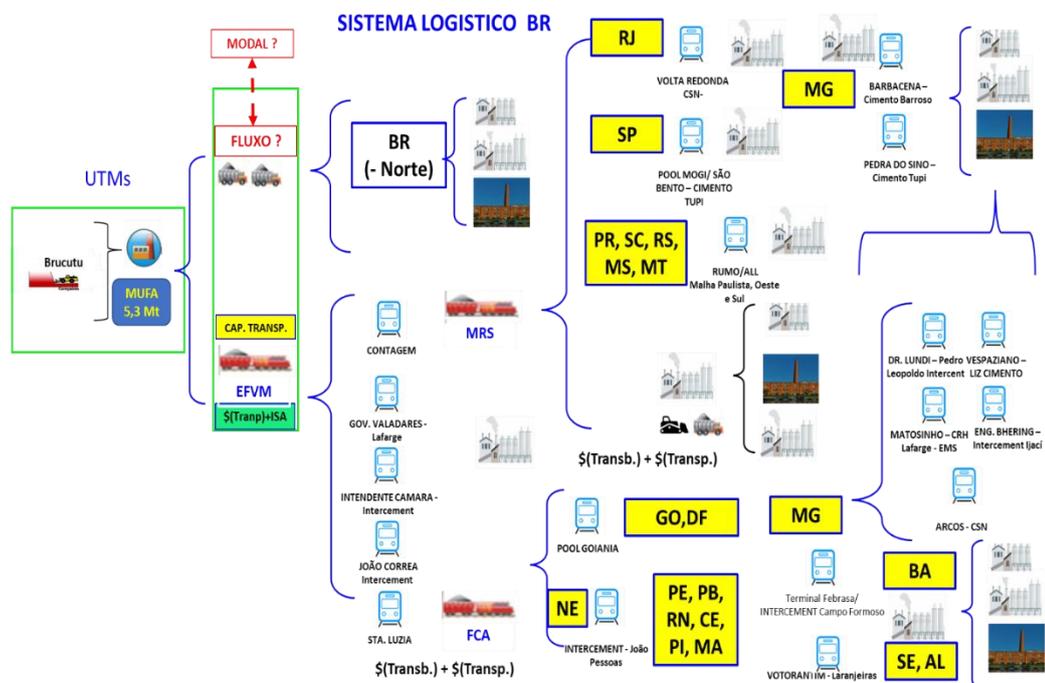


Figura 3-9 – Corredores e fluxos do Sistema Logístico proposto
 Fonte: Elaborado pelo autor (2022), a partir de ANTT (2021a)

Fleury (2012) indica que o meio de transporte utilizado impacta também sobre outros custos operacionais além do frete, como no caso do custo de estoque e transbordo; portanto, qualquer redução obtida nos custos logísticos impacta diretamente na lucratividade operacional da empresa.

Caixeta Filho e Martins (2001) não consideram somente os custos de transporte envolvidos, pois existem outras variáveis que influenciam o preço do frete, a saber: além da distância percorrida, custos operacionais, possibilidade de carga de retorno, sazonalidade da demanda, especificidade da carga transportada, vias utilizadas, pedágios, fiscalizações, prazos de entregas, perdas e avarias, e aspectos geográficos. Logo, demais custos relacionados aos diferentes modos de transporte do sistema logístico serão detalhados no próximo capítulo.

Outro fator importante a ser avaliado, corroborando com a proposta de alguns autores, é que muitos impactos são dinâmicos e, por vezes, alguns benefícios demoram anos para serem percebidos pela sociedade, como por exemplo, uma capacitação educativa, ou também podem nunca ser percebidos, como alguns riscos de acidentes. Entretanto, para efeitos de simplificação do modelo, o tempo será discretizado neste estudo.

No sistema logístico multimodal proposto, a demanda é considerada estacionária e constante ao longo do ano, isto é, a frequência de entrega é constante, com periodicidade semanal. Assim, os impactos manifestados pelo sistema de transporte também foram considerados ao longo do ano.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O desenho de rede do sistema logísticos multimodais sustentáveis desenvolvido neste estudo foi obtido, inicialmente, com base na metodologia proposta por Soncim (2002) que, a partir de sua pesquisa bibliográfica, adotou uma série de atividades para seleção de alternativas de transportes multimodais de um produto de origem mineral. Para o desenvolvimento deste trabalho, contudo, uma visão mais holística e moderna, que incorpora aspectos da sustentabilidade proposta por Barbosa-Povoa et al. (2018), por meio de uma análise de ACV simplificada, foi adaptada a essa metodologia.

O fluxograma na Figura 4-1 mostra a sequência de atividades utilizada como alicerce metodológico desta pesquisa, que é composta por uma série de módulos, sendo que os destacados em azul são formados por dados de entrada do modelo multiobjetivo.

Nota-se, primeiramente, a caracterização da carga (produto, embalagem), seguida pelo estudo da demanda regional por canal do mercado (segmentação de Marketing). As considerações do sistema logístico, que compreende a geolocalização dos *hubs* e infraestruturas multimodais, definição do fluxo logístico e da identificação da rede de transportes na região pretendida sob a influência do corredor, distâncias reais e restrições de capacidade, são observadas na sequência. Paralelamente, encontra-se um estudo de ACV simplificado para determinar os impactos socioambientais do sistema proposto.

Após a ponderação geométrica dos dados calculados a partir das localizações de cada cidade e consolidados por mesorregião, formando uma base de parâmetros aplicada a um algoritmo de otimização linear para determinação do fluxo multimodal a um Lucro Total máximo do Sistema Logístico, finalmente, compõe-se a análise na tomada de decisões de determinação de fluxos de redes nos sistemas multimodais de cargas, com a obtenção do seu desenho (configuração). Após o primeiro resultado da otimização, com atendimento de 100% da demanda estimada, uma seleção das mesorregiões mais lucrativas foi efetuada e, a partir dessa nova consideração, o modelo foi novamente otimizado.

Dessa forma, a descrição do problema do capítulo anterior é balizada neste capítulo por um referencial teórico sobre metodologias de resolução de otimização multiobjetivo para sistemas logísticos sustentáveis, entre outros alinhamentos de conceitos (seção 4.1). Na seção 4.2, os parâmetros relativos ao sistema logístico e ao atendimento da demanda foram consolidados e aplicados a esse modelo com uma abordagem multiobjetiva, que considerou, além da maximização dos aspectos econômicos fornecida pelo LT, a minimização dos impactos

socioambientais negativos e a maximização dos impactos sociais positivos. Dessa forma, desenvolve-se um modelo multiobjetivo mediante a aplicação do método de resolução de restrição ϵ -ampliada na seção 4.3. Na seção 4.4 foram apresentados os diferentes cenários com diferentes pesos relativos aos pilares da sustentabilidade.

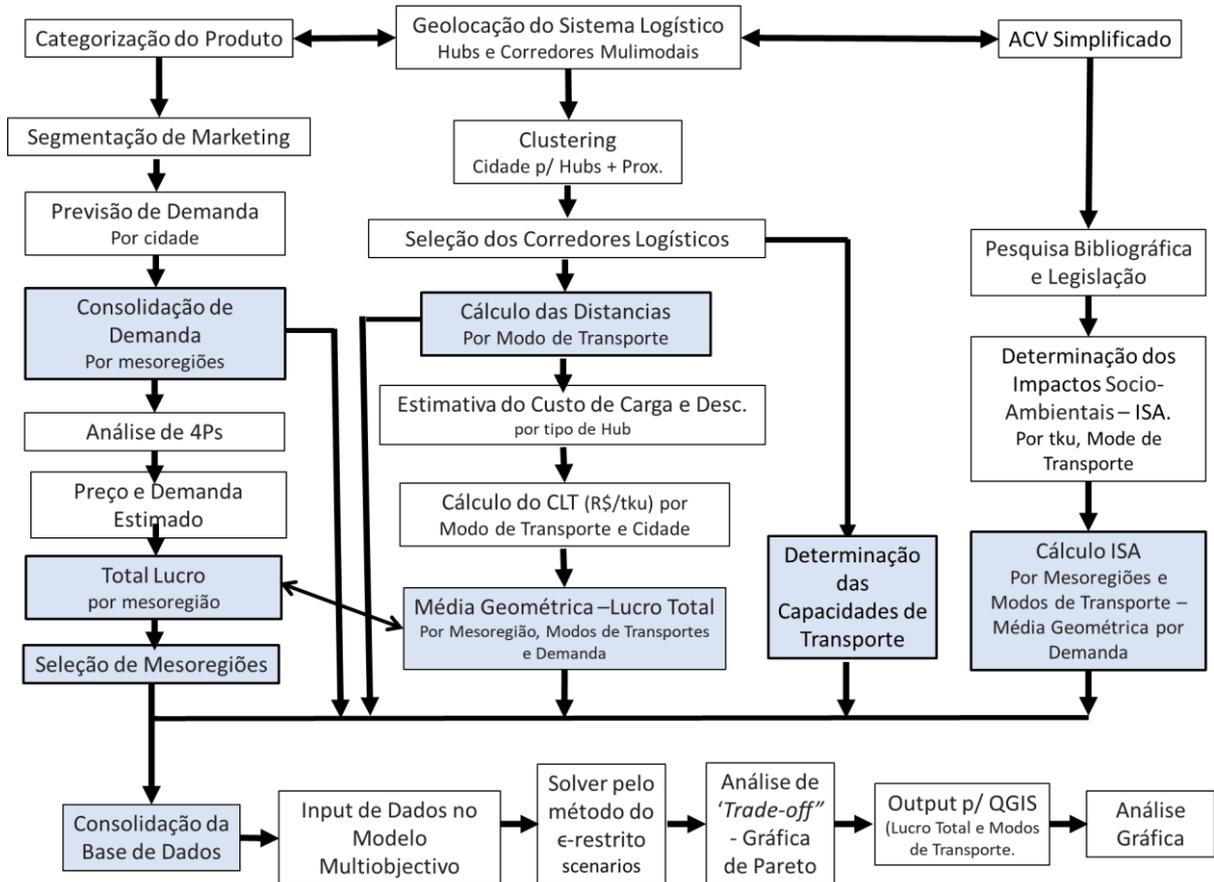


Figura 4-1 – Metodologia de Desenho de Sistemas Logísticos Sustentáveis com Otimização Multiobjetivo
Fonte: Adaptado de Soncim (2002) e Barbosa-Povoa et al. (2018)

4.1 REFERENCIAL TEÓRICO E CONCEITOS UTILIZADOS NA METODOLOGIA PROPOSTA

Algumas definições da Logística podem ser ambíguas e causar falsas interpretações. Por essa razão, o desenvolvimento deste referencial pretende alinhar alguns conceitos que serão utilizados ao longo desta dissertação para um perfeito entendimento e demonstrar a relação entre as variáveis logísticas e uma metodologia de resolução para problemas de otimização linear multiobjetivo.

4.1.1 *Hubs* – terminais logísticos

Os *hubs* da empresa estudada, disponíveis no sistema logístico nacional e detalhados nos Apêndices A e B, servem para transbordo de coprodutos, ou seja, servem como ponto de transferência de carga entre modos de transporte. Alguns *hubs* próprios já possuem estruturas logísticas para transbordo preparadas para o minério de ferro, portanto, só precisam de adequação quanto ao novo volume a ser recebido pelos coprodutos, pois contam com capacidade limitada, de acordo com a quantidade e produtividade dos seus equipamentos de carga e descarga. *Hubs* que, atualmente, são focados em grãos, para atenderem ao caso presente, precisariam alugar equipamentos adequados para efetuar os respectivos trasbordos, gerando maiores custos de movimentação e armazenagem em pátio externo quando necessário, o que pode acarretar maior custo operacional.

Mulinas et al. (2012) conceituam terminal portuário como um sistema integrado com conexão física e de informação com as redes de transporte terrestre e marítimo, no entanto, o termo “terminal” é, semanticamente, empregado com uma conotação equivocada, uma vez que se refere a qualquer estação ferroviária ou portuária, ainda que esta não esteja, necessariamente, no término da sua linha, mas compondo uma malha integrada a outros modais de transporte.

Para esses tipos de instalações, este estudo adotará o termo “*hub* logístico”, que Jorgensen (2007) define como sendo um centro integrador de transbordo, armazenagem, coleta, produção e distribuição de mercadorias e bens. Os *hubs* logísticos, além de terminais integradores de diferentes modos de transporte ou de diferentes concessões, como no caso ferroviário, ainda prestam tipos de serviço: “[...] coleta, unitização/desunitização, movimentação, armazenagem e entrega de carga ao destinatário, bem como a realização dos serviços correlatos que forem contratados entre a origem e o destino, inclusive os de consolidação e desconsolidação documental de cargas” (BRASIL, 1998).

4.1.2 Relações entre variáveis

Agrawal e Toktay (2010) representam graficamente, de forma genérica, as inter-relações entre os atributos – nodos do desenho com as setas que estabelecem a importância relativa entre eles (Figura 4-2). Pienyck e McKinnon (2010), por sua vez, de modo mais específico, relacionam os fatores associados a emissão de CO₂ para o transporte rodoviário na Figura 4-3.

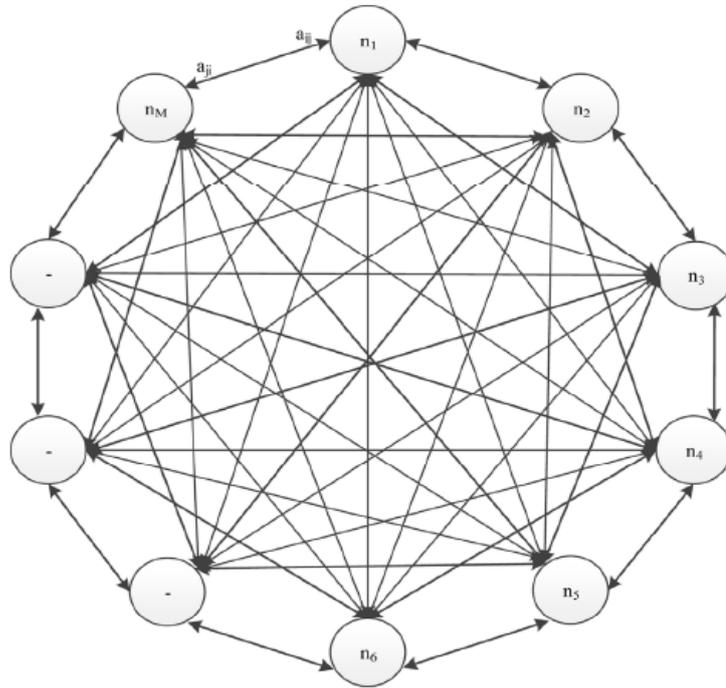


Figura 4-2 – Representação gráfica das relações entre parâmetros
Fonte: Agrawal e Toktay (2010)

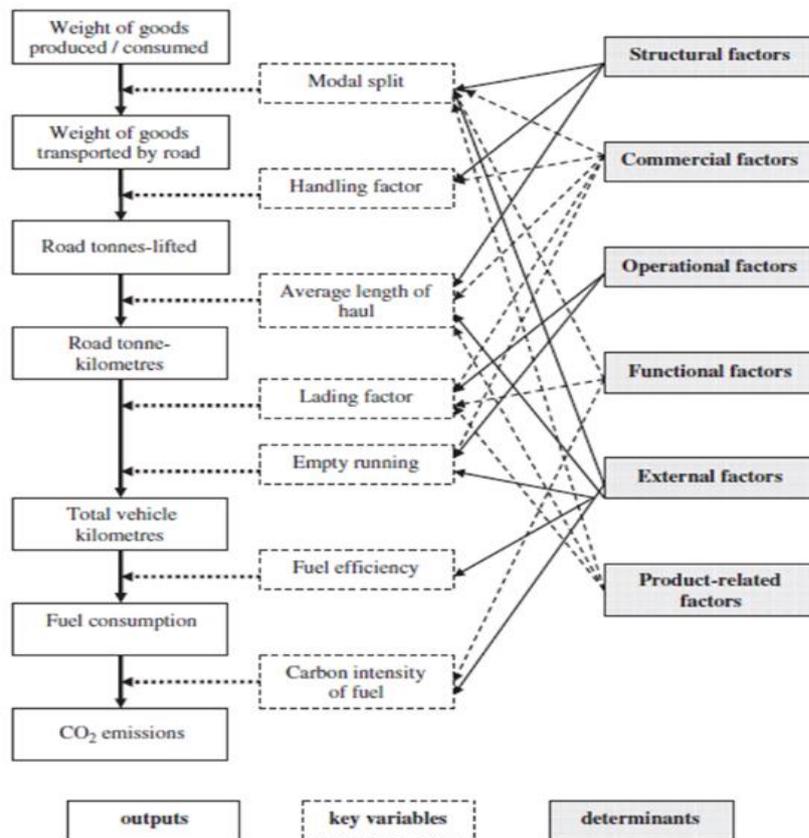


Figura 4-3 – Representação gráfica das relações entre parâmetros na Logística
Fonte: Piecyk e McKinnon (2010)

A relação entre os parâmetros estabelecidos nesse estudo apresentadas nesta subseção foi demonstrada na Figura 5-5, que avalia o comportamento dos parâmetros estabelecidos em função de uma variação imposta a um deles em forma de restrição de desigualdade.

4.1.3 Distâncias entre rotas dos modos de transporte

Uma consideração importante deste estudo está relacionada com a forma de medida das distâncias dos sistemas de transporte, que é o principal critério para determinar o custo das tarifas de frete dos diferentes modos de transporte do sistema logístico e seus impactos socioambientais.

Ballou (2001) destaca que, na definição da localização dos *hubs*, considerar sua distância da cidade destino apenas como uma linha reta, ou ainda multiplicar a distância euclidiana por um fator de circuito, pode ocasionar inconsistências entre os dados, gerando interpretações equivocadas, ainda mais no Brasil, com suas particularidades geográficas e logísticas.

Na Figura 4-4, no lado esquerdo, é possível observar a diferença entre as distâncias das cidades aos *hubs* em linha reta, e no mapa localizado à direita, as distâncias reais entre as malhas multimodais. Essa diferença decorre, principalmente, das diferentes características geográficas das regiões e da existência de infraestrutura suficiente, como no estado de Amazonas, que devido ao rio Amazonas, possui uma distância rodoviária real bem maior do aquela em linha reta proposta pelo QGIS (2020).

Portanto, foram consideradas as distâncias reais existentes entre as malhas analisadas (rodoviárias, ferroviárias e aquaviárias), obtidas com um algoritmo de cálculo da melhor rota, com a utilização de um *plugin* do *software* QGIS (2020). Os valores de distância rodoviária não encontrados por essa ferramenta foram consultados e analisados segundo o *site* Rotas Brasil (2021); os dados foram consolidados e tratados para, finalmente, serem devidamente comparados.

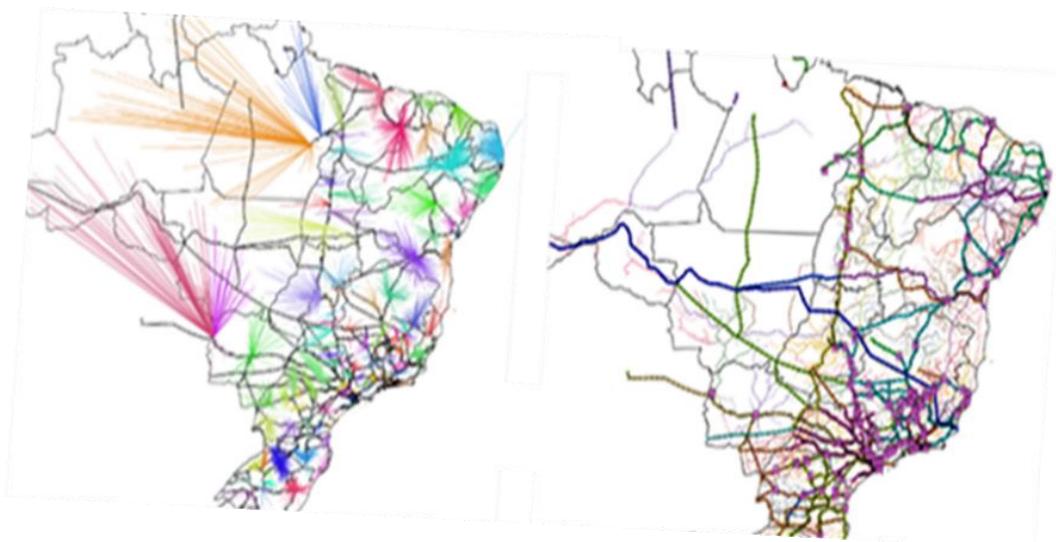


Figura 4-4 – Distâncias entre hubs mais próximos: linha reta x distâncias reais
 Fonte: Adaptado de Brasil, (2021a) e QGIS (2020)

4.1.4 *Supply Chain* Sustentáveis e Economia Circular

4.1.4.1 Sustentabilidade na mineração e na construção

Em razão da magnitude das escalas produtivas de *Supply Chains* na mineração e na construção civil e seus impactos socioambientais massivos, como o consumo de energia e de recursos naturais, além de emissões de Gás do efeito estufa - GEE e Poluentes Atmosféricos - PA, os *stakeholders*, tomadores de decisão envolvidos nessas cadeias de suprimentos, são grandes responsáveis por promover o desenvolvimento sustentável, de forma a não comprometer as gerações futuras e garantir sua própria sobrevivência no mercado.

Um dos principais canais consumidores e, conseqüentemente, beneficiados a ser considerado, é a cadeia do cimento e seus derivados, pois o rejeito pode vir a substituir parte da matéria-prima do clínquer, do cimento composto e/ou do concreto. O estudo de caso desenvolvido por Formentini e Taticchi (2016), que contou com análises cruzadas das entrevistas, transcritas e codificadas, sobre as três diferentes esferas da sustentabilidade, revelou que as principais estratégias ao longo da *Supply Chain* do cimento são voltadas para a redução do consumo de energia, de recursos naturais (calcário e argila) e emissão de CO_2 , além de reutilização de rejeitos em outras cadeias, impactado por estudos de ACV (Ciclo de Vida).

Outras estratégias levantadas pelos autores mencionam o Código de Ética estruturado entre elos da *Supply Chain*, regulamentações como a ISO 14.001, que regem o setor e, no que se refere à parte corporativa, existe uma boa relação entre as empresas concorrentes, sob forte

influência do Sindicato Nacional das Indústrias Cimento (SNIC), responsável por desenvolver o *Roadmap* Tecnológico do Cimento (SNIC, 2019c), que corrobora com as estratégias sustentáveis.

Dentre os princípios de desenvolvimento sustentável aplicáveis à cadeia da mineração e da construção civil no que diz respeito às dimensões econômica, ambiental e social, encontram-se a responsabilidade para com o uso de recursos naturais e a destinação dos rejeitos das atividades, além da poluição do meio ambiente, aliada aos princípios-chave do conceito de Capitalismo Natural, como proposto por Hawken et al. (2013).

Os autores caracterizam o conceito como uma nova onda da revolução industrial, que redesenha sistemas produtivos em linhas biológicas com o fechamento dos “*loops*”, como por exemplo, a aplicação da logística reversa para diminuir perdas e toxidades geradas de seus processos produtivos, reduzindo a pressão nos sistemas naturais ao transformar suas perdas em coprodutos de valor agregado, achatando custos e assegurando o não comprometimento das gerações futuras e benefícios diretos para os *shareholders* atuais.

Embora a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) considere que os rejeitos gerados no processo de beneficiamento do minério de ferro não são perigosos, devido ao possível rompimento das barragens, tais rejeitos se tornam, na verdade, altamente nocivos. Esse risco potencial, além do desastroso impacto do rompimento das barragens que o acondicionam, é prejudicial à sociedade e ao meio ambiente.

Após os dois acidentes de rompimento das barragens de Brumadinho e Mariana, o governo brasileiro criou novas regularizações para o tratamento desse tipo de resíduo. A nova Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída pela Lei nº 14.066 (BRASIL, 2020), proíbe a instalação de novas barragens com a utilização da técnica de alteamento a montante, sob pena de multa de até R\$ 1 bilhão, e define o prazo de dois anos para a adequação das barragens atuais.

Logo, o desenvolvimento de um plano de gestão integrada sobre os rejeitos gerados no processo de beneficiamento do minério de ferro é de extrema importância. Sua disposição final segura é definida pelo descarte dos bens, utilizando um meio controlado que não danifique o meio ambiente e que não atinja, direta ou indiretamente, a sociedade (LEITE, 2003).

Ballou (2001) considera que a seleção de um modo de transporte pode ser adotada para criar uma vantagem competitiva de prestação de serviço, porém, a escolha do tipo de transporte que comporá o sistema logístico também está diretamente relacionada ao desenvolvimento

sustentável, com impactos positivos e negativos, de acordo com o sistema de transporte adotado, em todas suas esferas.

Faz-se necessária a incorporação dessa visão tridimensional para a tomada de decisão, com a determinação de um sistema logístico sustentável. Assim, o desejo de aplicação de um sistema estruturado de logística reversa revela uma visão ampliada de responsabilidade sobre todo o ciclo de vida do produto e não somente durante a vida útil. Passa-se a considerar, assim a minimização dos impactos ambientais, para as possibilidades de maximizar o desenvolvimento de atividades econômicas e pelo comprometimento para com o futuro da sociedade.

O conceito de sustentabilidade, equiparado por Elkington (1994) ao conceito do *Triple Bottom Line* (TBL), pode ser incorporado à proposta do presente estudo. Inicialmente, o autor propôs que a definição conceitual recaia sobre as três esferas de desempenho – a social, ambiental e econômica.

Slaper e Tanya (2011) exploram o conceito de TBL, relacionando-o ao conceito de “3Ps” (*People, Planet and Profits*), e destacam a dificuldade encontrada para sua mensuração, pois o desdobramento do conceito abarca comparações entre variáveis qualitativas e quantitativas, de diferentes dimensões, pesos e unidades. Por fim, os autores, indicam que cada caso deve ser criteriosamente analisado, considerando suas devidas particularidades.

4.1.4.2 Sustentabilidade na *Supply Chain* – Sistema Logístico

Possivelmente, de acordo com Schmidheiny (1992), o fator mais importante para alcançar o desenvolvimento sustentável é obter o preço certo, ou seja, conseguir mensurar e comparar os respectivos impactos nos âmbitos econômicos, sociais e ambientais. Para tanto, é preciso compreender os impactos gerados pelas atividades corporativas sobre as três esferas.

Geissdoerfer et al. (2017) consideram a sustentabilidade como um sistema de integração intra e intergeracional de performance econômica, social e ambiental. O’Riordan (1993), por sua vez, com uma visão mais clássica, classifica a sustentabilidade como um conceito político, equiparando sua importância aos conceitos de democracia, justiça e liberdade.

Para Sodhi (2015), alguns autores, defensores de uma visão mais tradicional, argumentam que o termo sustentável é redundante, pois seus princípios já estariam embutidos

no *Supply Chain Management* (SCM). Todavia, como será esclarecido a seguir nas definições dos respectivos conselhos, a logística reversa está embutida nesse conceito.

A questão de sustentabilidade na logística (SCS) é muito maior do que somente a aplicação da logística reversa ou ponderações sobre a questão da emissão de GEE: existem inúmeros fatores ambientais e sociais a serem considerados para que um sistema logístico seja sustentável, conforme definições de Carter e Rogers (2008) em uma abordagem mais ampliada para o *Sustainable Supply Chain Management* (SSCM), que por meio de uma estratégia integrativa e transparente, visa metas de organização do social, ambiental e econômica, com o uso da coordenação sistêmica dos processos-chave interorganizacionais para melhorar a performance econômica individual da empresa e de sua *Supply Chain* a longo prazo.

4.1.4.3 Responsabilidade Social Corporativa (RSC) na *Supply Chain*

Nos últimos tempos, no meio acadêmico e corporativo, o impacto social era pouco considerado na tomada de decisão pelos gestores de logística, de acordo com as observações de Agrawal e Toktay (2010) e Beske-Janssen et al. (2015); entretanto, esse fato está mudando.

Com o desenvolvimento da tecnologia de informação e suas aplicações no comércio global entre empresas, as *Supply Chains* tornam-se cada vez mais integradas e transparentes com a troca de informações e alinhamento de planejamento estratégico; desse modo, as relações comerciais entre os fornecedores e clientes, além de alcançar níveis globais, ganham visibilidade no mercado, além de impactos positivos e negativos gerados por cada elo dessas cadeias nas três esferas consideradas – econômica, ambiental e social.

Por outro lado, Friedman (1970), favorável ao liberalismo econômico, entendia que a responsabilidade social visava somente o aumento dos lucros, mesmo que em um sentido unidimensional, como a redução de custos ou a maximização dos lucros em curto tempo.

Os dias atuais, contudo, têm trazido uma crescente e genuína preocupação relacionada à Responsabilidade Social Corporativa (RSC) por parte da sociedade e, conseqüentemente, no meio acadêmico e empresarial, inclusive fazendo relação com, pelo menos, oito diretrizes das metas globais adotadas pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2015) na Agenda 2030 e alinhadas aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) (BRASIL, 2015).

Caso a projeção de crescimento da população mundial realizada pela ONU (2019), de 7 bilhões em 2017 para 9 bilhões em 2050, se concretize, aumentar-se-ia também o consumo de

recursos naturais de fontes não renováveis, além da emissão de resíduos e Gás do Efeito Estufa (GEF), podendo atingir níveis críticos para a saúde e sobrevivência humana. Logo, a preocupação decorrente da criação e desenvolvimento de *Supply Chains* Sustentáveis tem ganhado crescente destaque na sociedade em geral, no meio corporativo e no acadêmico.

Para Carter e Rogers (2008), o termo de sustentabilidade na logística tem sido definido de forma inconsistente e aplicado de modo equivocado. Agrawal e Toktay (2010) relatam que uma grande quantidade de artigos e estudos relacionados à *Green Supply Chain*, com a Logística Reversa baseada em *Closed Loop Supply Chain*, foi desenvolvida até então, mas ainda existe muita oportunidade de pesquisa sobre a Responsabilidade Social Corporativa e sua incorporação no gerenciamento da *Supply Chain*.

Esse fato pode ser percebido na diferença indicada nas curvas do gráfico da Figura 4-5, conforme análise bibliométrica realizada por Beske-Janssen et al. (2015) entre a quantidade de artigos que relacionam as três esferas sustentáveis e somente duas, a econômica e/ou ambiental, ou somente com uma, a econômica.

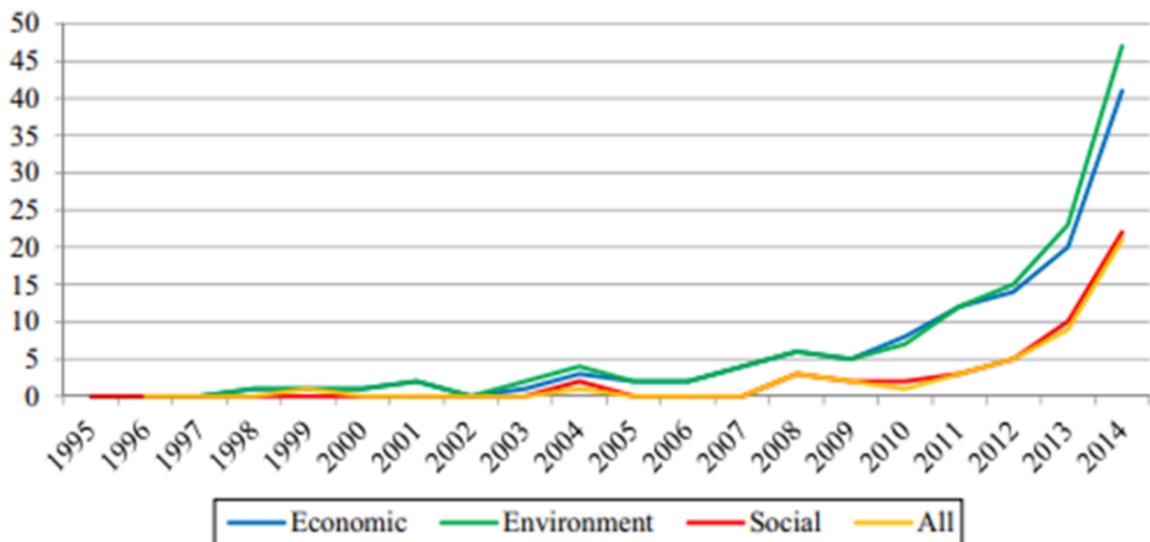


Figura 4-5 – Estudos com Dimensões da Sustentabilidade
Fonte: Beske-Janssen et al. (2015)

Guarnier (2014) inicia sua revisão com a diferenciação da Logística Verde, *Green Supply Chain*, que por muitas vezes é confundida com a Logística Reversa. A autora explica que a logística reversa, basicamente, operacionaliza o retorno dos resíduos após a sua geração, sua revalorização e reinserção econômica, sendo uma ferramenta da GSC, que de forma mais ampla, atende aos princípios da sustentabilidade ambiental. A logística reversa também integra um processo logístico direto, fechando o ciclo logístico total.

O conceito de GSC, por vezes, ainda é confundido com o de SCS (MCKINNON et al., 2010). Zhang et al. (2017), ao definirem GSC, consideraram que os objetivos sociais estavam incluídos na definição, que envolve, no entanto, somente aspectos econômicos e ambientais.

A definição de Responsabilidade Social na *Supply Chain* é descrita como um produto ou processo com aspectos relacionados das operações que afetam a segurança, o bem-estar e o desenvolvimento da comunidade (KLASSEN; VEREECKE, 2012). De acordo com os autores, a responsabilidade social na *Supply Chains* não é bem compreendida, pois trata-se de uma área embrionária com muito a ser desenvolvido.

Sob essa ótica, Tang (2018) foca seu estudo na contextualização da RCS nas *Supply Chains* de países em desenvolvimento, em razão da percepção de grandes empresas sobre a obrigação social de promover esse crescimento e não violar normas éticas.

4.1.4.4 Economia Circular (EC) na *Supply Chain*

Com uma perspectiva mais divergente, Van Beers et al. (2007) definem Economia Aglomerativa como uma situação econômica, quando duas empresas obtêm sinergia pelo compartilhamento de uma infraestrutura – mesma situação do estudo de caso deste estudo. Existe ainda outro fenômeno conhecido como Simbiose Industrial, proposto por Chertow e Ehrenfeld (2012), que aplicam o conceito de mutualismo nos sistemas ecológicos, quando duas espécies se beneficiam da relação. No segmento empresarial, essa relação sinérgica é conhecida como relação “ganha-ganha”.

Essa relação é fator fundamental para o desenvolvimento da Economia Circular, que envolve, necessariamente, mais de um agente do mercado. Nesse cenário, a logística é um meio fundamental conectivo que possibilita o fluxo de matérias primas/produtos/serviço, financeiro e de informações ao longo da *Supply Chain* conectiva entre os agentes.

Geissdoerfer et al. (2017) avaliam que o tema Economia Circular, ou *Circular Economy* (CE), tem ganhado importância no meio acadêmico com uma série de tópicos publicados pelos estudiosos Andersen (2007) e Ghisellini et al. (2016), e no meio governamental em diversos países: a Europa lançou um pacote econômico (EC, 2014; 2015), enquanto a China publicou a lei de promoção da economia circular (CHINA, 2008).

O conceito de Economia Circular teve origem na década de 70, baseado em outras conceituações, como “*Spaceman economy*” (BOULDING, 1996), “*Limits to growth*”

(MEADOWS et al., 1972), “*Steady-state economy*” (DALY, 2005), “*Performance economy*” (STAHEL, 2010), “*Industrial ecology*” (FROSH, 1989), “*Cradle-to-cradle*” (STAHEL; REDAY-MULVEY, 1981; MCDONOUGH; BRAUNGART, 2002), “*Natural Capitalism*” (HAWKEN et al., (2013) e “*Blue Economy Systems*” (PAULI, 2015).

Academicamente, o conceito foi introduzido por Turner e Pearce (1993). Segundo os autores, trata-se de um sistema regenerativo que visa diminuir perdas, resíduos, emissões e energia com um *loop* no sistema, por meio dos serviços de reparo, manutenção, reutilização, reciclagem, recondição e projetos de longo prazo, entretanto, para Kalmykova et al. (2018), ainda há um borrão nos contornos das definições conceituais relacionadas ao tema. Seu artigo, portanto, visa clarear essas compreensões e melhorar os interesses, motivações e implicações práticas para seu uso pelos setores público e privado.

A crescente expectativa em torno do tema decorre do crescimento econômico promovido pela EC, criando negócios e oportunidades de empregos, economizando material, custos, minimizando a volatilidade dos preços e melhorando a segurança dos fornecedores, enquanto reduz o impacto e a pressão ambiental. Dessa maneira, os governos têm expectativas de redução de custos e ganhos para incremento da economia dos seus respectivos países, com programas de incentivos e planos de aceleração de EC.

A “*ecoeficiência*” é outro princípio relacionado à EC abordado pelos autores em 2018, que foi surgindo de diferentes maneiras, sendo que algumas delas forçam a *ecoeficiência* como propósito da EC ou a definem como sinônimo (STAHEL, 2013; WIJMAN; SKÅNBERG, 2015). Sob outra perspectiva, Ellen MacArthur Foundation (EMF, 2012), entende a “*ecoeficiência*” como consequência da EC e distingue dois conceitos: “*ecoeficiência*” e “*ecoefetividade*”.

De acordo com EMF (2012), o termo *ecoeficiência* foi definido como a minimização de desmaterialização baseada na minimização de volume, velocidade e da toxicidade dos fluxos sistêmico de materiais; por outro lado, a *ecoefetividade* foca na transformação de produtos e fluxos de materiais associados de forma a suportar as relações com os sistemas ecológicos e com o futuro crescimento econômico. O objetivo seria, então, circular a economia e não minimizar o fluxo de “*cradle to cradle*”.

A EMF (2012) acredita que é melhor buscar a *ecoefetividade* ao invés da *ecoeficiência*, que tem como um de seus princípios:

[...] compatibilização entre o fornecimento, a preços competitivos, de bens e serviços qualificados que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida e a redução do impacto ambiental e do consumo de recursos naturais a um nível, no mínimo, equivalente à capacidade de sustentação estimada do planeta”. (BRASIL, 2010)

Kalmykova et al. (2018) propõem, na Figura 4-6, um fluxo circular para expressar a relação dos processos produtivos – redução de desperdícios e perdas (3Rs), otimização de estoque ao longo da cadeia e, conseqüentemente, fluxo logístico otimizado –, evidenciando o fluxo de recursos sobre os elos da cadeia de valor e de produção na economia circular.

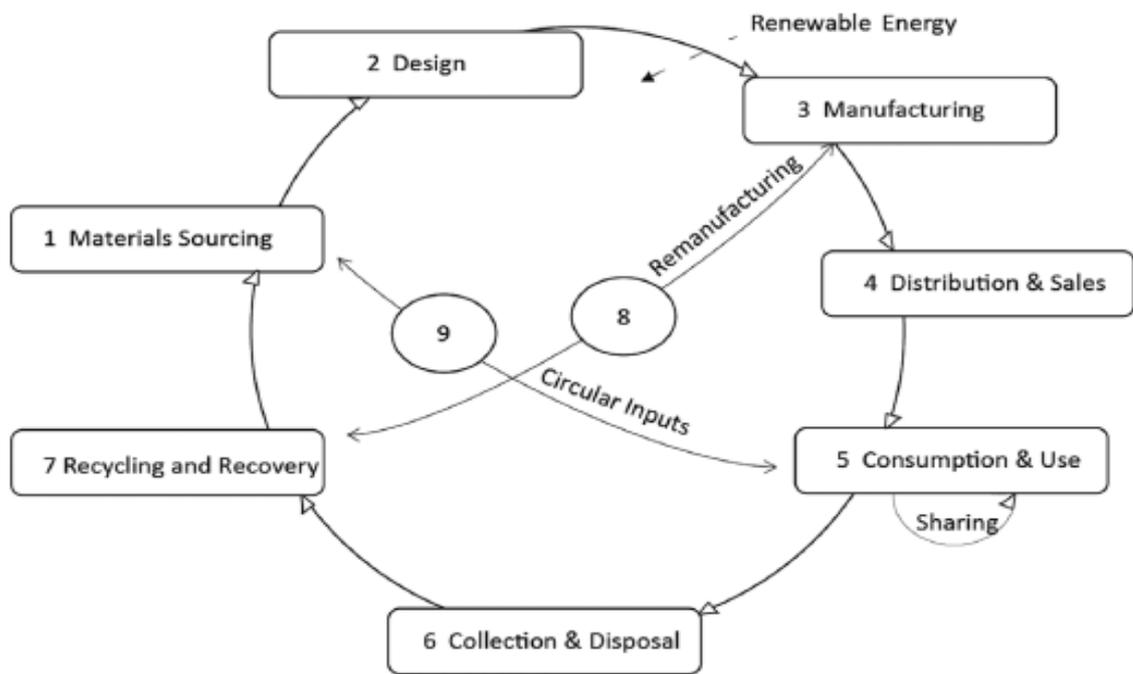


Figura 4-6 – Fluxo de recursos sobre os elos da cadeia de valor na economia circular
Fonte: Kalmykova et al. (2018)

O conceito de Economia Circular ainda está em evolução e adequação, como é possível notar nas ponderações da EMF, uma importante fundação da área, que alcançou quatro conceituações no período de oito anos.

A definição da EMF (2015) estava pautada em uma economia que proporciona diversos mecanismos criativos de valor, que se desacoplam do consumo de recursos não renováveis. Posteriormente, a fundação define o conceito como uma atividade econômica de construção e reconstrução de capital econômico, natural e social, baseado nos princípios de eliminação de resíduos e poluição, regeneração de sistemas naturais e manutenção de produtos e matérias em uso, desacoplando gradualmente a atividade econômica de consumo de recursos finitos, apoiado para uma transição para fontes de energias renováveis (EFM, 2020).

O sistema precisa funcionar em todos os níveis, para grandes e pequenas empresas, para organizações e indivíduos, global e localmente. Essa mudança sistemática da economia linear para a circular não visa apenas minimizar impactos negativos causados pela primeira, pois constrói resiliência a longo prazo, gerando negócios e oportunidades econômicas e benefícios socioambientais em todos os níveis. O modelo proposto classifica os ciclos materiais gerados entre biológicos e técnicos: os biológicos são desenhados para reinserção na natureza; os técnicos, por sua vez, exigem investimento em inovação para serem desmontados e recuperados (EFM, 2020).

Kalmykova et al. (2018) salientam que, na EC, o crescimento é resultado de uma alavancagem, aumentando o valor dos produtos e materiais entregues nas estruturas econômicas existentes. Na visão de Stahel (2013), a EC foca na otimização de estoques e nos “três *loops* – Reuso, Recondicionamento, Reciclagem”, além do aumento do ciclo de vida do produto.

De acordo com China (2008), EC é um termo geral para Reduzir e Reutilizar, aplicando atividades de Reciclagem nos processos produtivos, distribuição e consumo. Na visão da Comunidade Europeia (CE, 2015), a EC ocorre quando os materiais, recursos e produtos são mantidos na economia por mais tempo possível e a geração de desperdícios é minimizada.

Wrap (2016) entende a EC como uma alternativa à economia linear (fazer, usar e dispor), em que a utilização do produto e a agregação de valor é maximizada, recuperando e regenerando materiais no final de cada ciclo do produto. Nessa concepção, Azevedo (2015) conceitua a economia circular, ou economia restaurativa por natureza, nascida na década de 70, que pressupõe a ruptura do modelo econômico linear (extrair, transformar e descartar), atualmente aplicado pela grande maioria das empresas para a implantação de um modelo, no qual todos os tipos de materiais são elaborados para circular de forma eficiente e serem recolocados na produção, sem perda da qualidade.

Em uma visão mais ampla, Bastein et al. (2013) a conceituam como um sistema econômico e industrial fundamentado na reutilização de produtos, matérias-primas e capacidades restaurativas de recursos naturais, que também visam minimizar a destruição de valor em cada elo desse sistema.

4.1.5 Métodos de resolução de problemas de otimização multiobjetivos

Azuma (2011) define três metas importantes a serem consideradas na otimização multiobjetivo: obter soluções próximas da fronteira de Pareto; obter um conjunto de soluções

com a maior diversidade possível, o que inclui critérios de uniformidade no espalhamento ao longo da fronteira de Pareto; alcançar as duas metas anteriores com a melhor eficiência computacional possível. Segundo o autor, o resultado obtido dos parâmetros estabelecidos, representados nas funções objetivo dos métodos tradicionais de resolução de problemas multiobjetivos, pode ser dotado de diferentes magnitudes, logo, as respectivas normalizações são necessárias.

Para Oliveira (2020), os problemas de otimização multiobjetivos podem ser resolvidos com o uso de técnicas de Pesquisa Operacional (PO) de forma convencional ou com aplicação de heurísticas, e modelos com *Genetic Algorithms* (GA). A forma tradicional transforma, com o auxílio de métodos de escalarização, problemas multiobjetivos em um único objetivo, ou seja, essa técnica substitui problemas de otimização vetorial por problemas de otimização escalar. Dessa forma, as funções-objetivo secundárias são transformadas em restrições ou agregadas à principal, e as técnicas de otimização convencionais (mono-objetivo) podem ser aplicadas. Possibilita-se, então, a obtenção de pontos na curva de Pareto, também conhecida por fronteiras de Pareto, conforme se observa na Figura 4-7.

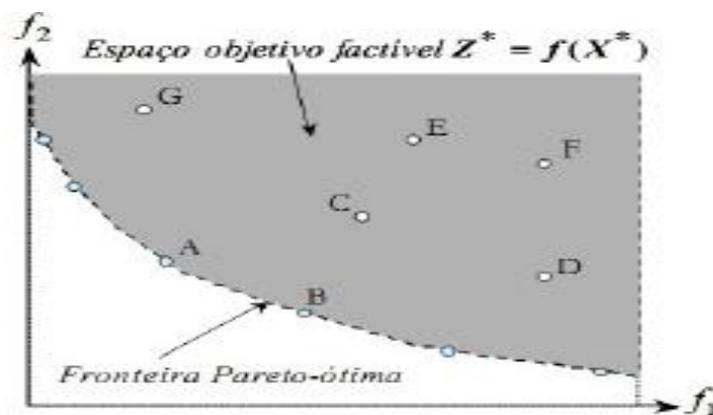


Figura 4-7 – Fronteira de Pareto-Ótima
Fonte: Azuma (2011)

Os métodos mais difundidos são os problemas das somas ponderadas dos objetivos, problemas do ε -restrito, abordagens híbridas entre somas ponderadas e do ε -restrito, além da programação por metas. Já os métodos não convencionais são utilizados para tratar de incertezas e combinações aleatórias em modelos mais robustos, com o uso de tratamentos heurísticos, como algoritmos de evolução genética. Essa metodologia é aplicada quando existe não convexidade, ou não linearidade nas funções-objetivo, ou entre variáveis envolvidas.

Segundo o autor, dentre os métodos convencionais, a soma ponderada dos objetivos é um método bem difundido no meio acadêmico, que consiste em criar uma função-objetivo

multiplicando por um peso as demais funções objetivas. Essa escolha dos pesos é de fundamental importância e pode ser determinada por entrevistas como a do método Delphi, baseado no julgamento segundo interesses dos *stakeholders* (AZUMA, 2011).

4.1.5.1 Método de resolução de ε -restrições

A escalarização do ε -restrito é outro método convencional bastante difundido no meio acadêmico. Trata-se de uma aplicação intuitiva, cujos parâmetros podem ser simplesmente interpretados com o uso de uma análise de sensibilidade aos objetivos secundários propostos. Essa técnica consiste, basicamente, na escolha de um dos objetivos a serem potencialmente otimizados, transformando-o em uma restrição e, a ela, são impostos valores ε , na direção do objetivo de sua otimização, conforme ilustrado pela Figura 4-8.

A vantagem dessa abordagem é sua utilização em problemas com espaços objetivos convexos, não convexos ou discretos (AZUMA, 2011).

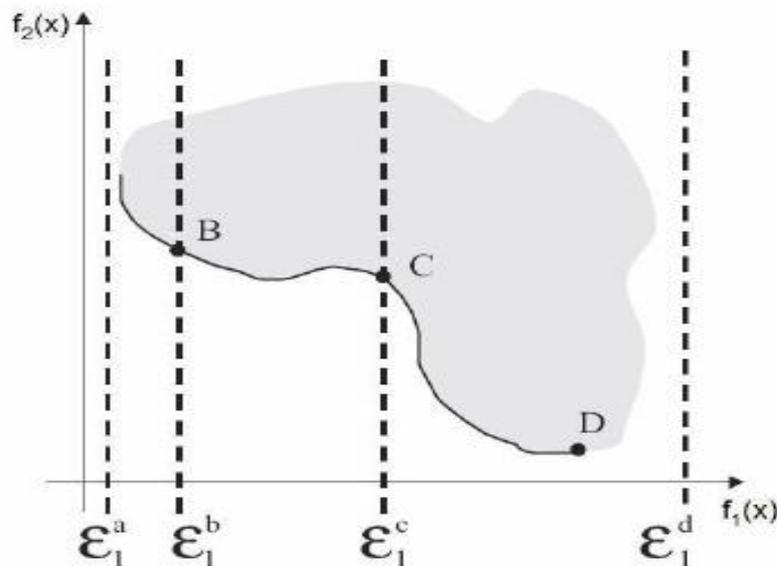


Figura 4-8 – Método do ε -restrito
Fonte: Azuma (2011)

Azuma (2011) classifica métodos de solução de problemas multiobjetivos em três tipos: *a priori*, *a posteriori* e iterativo, de acordo com o momento em que o decisor indica seus interesses. Quando o decisor é consultado antes de encontrar soluções para o problema multiobjetivo, os métodos *a priori* são subclassificados em lexicográfico, função utilidade, métodos baseados em limitantes e programação de metas, cuja vantagem é o baixo custo computacional.

No método lexicográfico, as funções objetivo são classificadas em ordem de preferência e o vetor de decisão ótimo é obtido com a minimização dos objetivos, de acordo com ordem de preferência estabelecida; no objetivo da função utilidade, o julgamento do decisor é expresso numericamente na forma da função, enquanto o baseado, nos limitantes.

O método decisor estabelece os limitantes inferiores e superiores, e pode ser usado para solucionar problemas multiobjetivo quanto há restrições de leis ou regulamentações de emissões de CO_2 , por exemplo; nos métodos *a posteriori*, a consulta do decisor é realizada depois da geração das soluções de Pareto ótimas. Dessa maneira, o decisor tem maior poder de decisão, pois conta com a oportunidade de analisar o conjunto de alternativas, porém, com maior custo computacional. Os métodos *a posteriori* de resolução são subclassificados em métodos das ponderações, das ε -restrições e simplex multiobjetivo.

O modelo de otimização multiobjetivo para desenho do sistema logístico multimodal e sustentável, depois de ter seus objetivos transformados, é composto por um conjunto de restrições que devem ser satisfeitas para que a solução seja factível. Define-se que N_{Obj} funções objetivo formam o vetor baseado no modelo de Azuma (2011).

$$f(x) = [f_1(x); f_2(x) \dots; f_{N_{Obj}}(x)]^T \quad (1)$$

Assim, o problema pode ser formulado como:

Maximizar/ Minimizar: $f(x)$

$$f(x) = \sum_{m=1}^{N_{Obj}} w_m \cdot f_m(x); \quad (2)$$

sujeita a:

$$g_j(x) \geq 0, j = 1, \dots, J; \quad (3)$$

$$h_k(x) = 0 \quad k = 1, \dots, K; \quad (4)$$

$$x_i^{(Inf)} \leq x_i \leq x_i^{(Sup)} \quad (5)$$

onde $w_n \in [0,1]$ é o peso de cada função objetivo f_n ($n=1, \dots, N_{Obj}$).

A soluções do problema J e K são, respectivamente, o número de restrições de desigualdade e de igualdade dada pelo vetor x , de variáveis de decisão tal que $x = [x_1, x_2, \dots, x_{N_{Var}}]^T$.

As desigualdades (3) e as igualdades (4) são chamadas de funções de restrição e os valores $x_{(inf)}$ e $x_{(sup)}$ representam o limite inferior e superior para a variável x_i . Esses limites estabelecem o espaço das variáveis de decisão, formado pelo conjunto de todas as soluções possíveis. O vetor de funções objetivo $f(x) = [f_1(x); f_2(x); \dots; f_{N.obj}(x)]T$ está contido no espaço dos objetivos e cada solução x no espaço das variáveis de decisão corresponde a um ponto $f(x)$ no espaço dos objetivos. Essas desigualdades são equiparadas a um valor chamado de ϵ restrito. Esse valor consiste nos valores desdobrados de um dos objetivos, em parâmetros decorridos dos impactos levantados na subseção 4.2.2.

4.2 CONSIDERAÇÕES DO SISTEMA LOGÍSTICO PARA MODELAGEM

Conforme características do sistema logístico elucidadas na subseção 3.1.3 e Apêndices A e B, as próximas subseções detalham as considerações adotadas na composição dos parâmetros constituintes do modelo também detalhado nas próximas seções.

4.2.1 Estimativa de demanda do mercado

Neste estudo de caso, diante da quantidade massiva de coprodutos disponível na UTM de Brucutu (em torno de 50 M tons anuais), considerou-se que o sistema está em equilíbrio, ou seja, a quantidade total de MUFA disponível é igual à soma de três canais de vendas para o mercado de materiais de construção – clínquer, concreto e cerâmica vermelha, conforme Figura 4-9, com origem na usina de Brucutu, sendo que cada canal de venda possui uma porcentagem máxima de substituição de matéria-prima, totalizando 12 Mt ao ano de utilização de coproduto, dos quais aproximadamente 3 Mt estão voltados para o canal de clínquer, 8 Mt para a cerâmica vermelha e 1 Mt para o canal de concreto (EMBRAPPI, 2021).

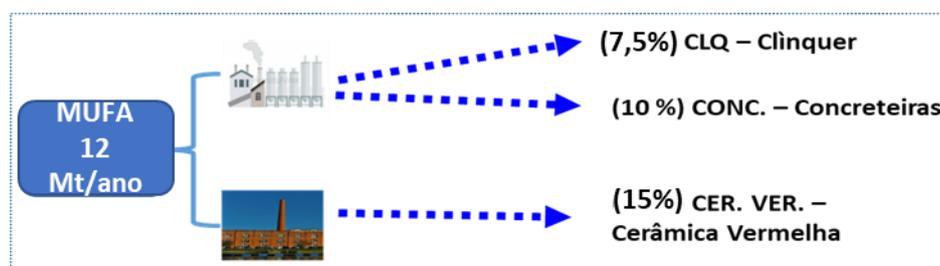


Figura 4-9 – Canais de vendas do MUFA e porcentagens de substituição de matéria-prima
Fonte: EMBRAPPI (2021)

Para estimar a demanda anual do coproduto substituto das matérias-primas do clínquer, no caso, a argila, considerou-se a produção por estado, do ano 2019, de acordo com o Sindicato

Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2019a) e o “*share*” de capacidade de produção de cada fábrica com relação ao seu respectivo estado, calculada a partir de dados de Cimento (2017).

A multiplicação dos dois números gerou uma previsão de demanda de produção de cimento para cada fábrica, que foi multiplicada por um fator de proporção de clínquer sobre o cimento de 69,4% (média do percentual de clínquer ponderada por produção), em conformidade com o tipo de cimento Portland e de acordo com a norma ABNT (2018), demonstrada na Tabela 4-1, resultando na estimativa de demanda do clínquer.

Essa demanda foi multiplicada pelo fator de 1.4, relacionando a proporção entre matéria-prima e produto final, devido à perda de água e gás carbônico na carbonatação do calcário, no processo de clinquerização. O resultado obtido ainda foi multiplicado pelo fator de substituição de matéria-prima de 7,5 %, resultando na previsão de demanda de consumo de coproduto por fábrica de clínquer, somente nas localidades produtoras. Finalmente, a demanda foi agrupada por cidade e consolidada no Apêndice D.

Tabela 4-1 – Participação média (%) de clínquer por tipo de cimento composto – Brasil

		56.611 kt cimento Brasil (SNIC 2019b)		
Teor de clínquer	Tipo de cimento	"Share" BR	Produção Cimento (kt)	Produção Clínquer (kt)
93,5%	CP I	0,4%	226	212
74,8%	CP II	62,1%	35155	26308
41,0%	CP III	14,2%	8039	3296
61,0%	CP IV	14,8%	8378	5111
91,0%	CP V	8,5%	4812	4379
TOTAL			56611	39305
Média % CLQ			69,4%	

Fonte: Adaptado de SNIC (2019a) e ABNT (2018)

No mercado de cerâmica vermelha, a estimativa de demanda de cada fábrica foi elaborada a partir do valor médio da faixa de classificação de porte, correspondente à produção da mina de argila, conforme Brasil (2007), demonstrada também no Apêndice D.

A argila extraída nas minas supre setores como os de cerâmica de revestimento de base seca, cimenteiro, agregado leve, entre outros. Cerca de 83% da argila extraída supre o mercado de cerâmica vermelha para materiais de construção civil (BRASIL, 2009), sendo assim, esse foi o *share* de cerâmica vermelha do mercado de argila considerado como fator de multiplicação.

O resultado ainda foi multiplicado pelo fator de substituição de matéria-prima de 20%, resultando na previsão de demanda de consumo de coproduto por fábrica que, finalmente, foi agrupada por cidade. Essa demanda não precisou ser multiplicada por um fator que relaciona a proporção entre matéria-prima e produto final, como foi feito no clínquer, uma vez que sua estimativa é realizada com base no total de argila produzido, matéria-prima para cerâmica vermelha.

Segundo o SNIC (2019b), que desdobra o total de cimento produzido em cada canal de venda (concreteiras, revendedores e outros) de cada estado, a estimativa de demanda do canal de concreto obteve consumo específico somente do segmento das concreteiras de cada estado. De acordo com o *share* de população (IBGE, 2020), obteve-se uma demanda por microrregião, que foi desdobrada para a população das cidades que abrigam as fábricas de concreto, indicadas pela Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem (ABESC, 2021), conforme pode ser observado no Apêndice D.

Assim, as áreas de abrangência comercial das fábricas concreteiras consideradas compreendem os limites das suas microrregiões e sua demanda foi estimada de forma proporcional às suas populações, a partir da aplicação do método de interpolação linear entre 3 pontos. Por fim, a produção das concreteiras foi multiplicada pelo coeficiente de substituição de matéria-prima de 10%, dada pela relação entre entrada e saída do processo produtivo, resultando no valor correspondente à demanda de coproduto de cada cidade para o canal de concreteiras.

As demandas de coproduto para atendimento ao canal de concreto estão concentradas nas cidades que possuem fábricas, mas foram estimadas segundo o *share* de população da microrregião em relação ao estado, que seria uma área de influência, portanto, os pontos de demanda não estão necessariamente localizados na cidade, mas na região de influência formada pela microrregião que compõe a fábrica. Nos casos em que há mais de uma cidade atendendo à microrregião, a estimativa da demanda foi feita pelo *share* da população dessas cidades em relação à microrregião.

A demanda foi considerada sem sazonalidade e estacionária, com abastecimento semanal. As demandas de coproduto dos três canais foram consolidadas por cidade e mapeadas na Figura 4-10 e, em seguida, consolidadas por cidade na Figura 4-11.

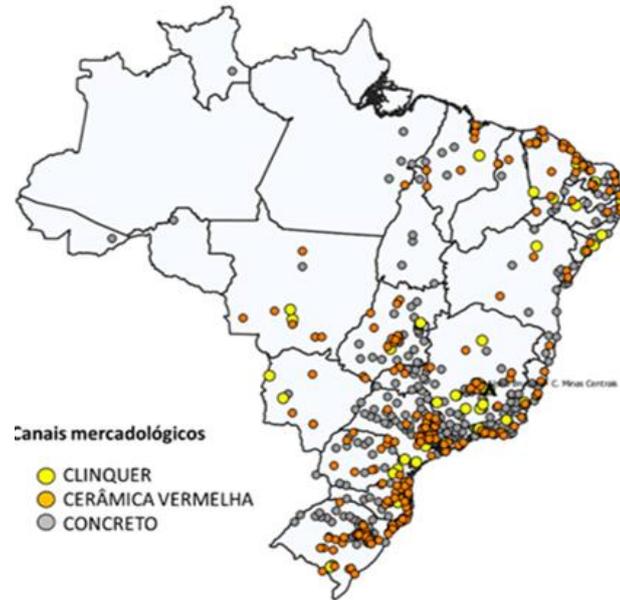


Figura 4-10 – Demanda estimadas de coproduto por canal e por cidade (t/sem)
 Fonte: Adaptado de SNIC (2019a), ABNT (2018), IBGE (2020), Brasil (2007) e QGIS (2020)

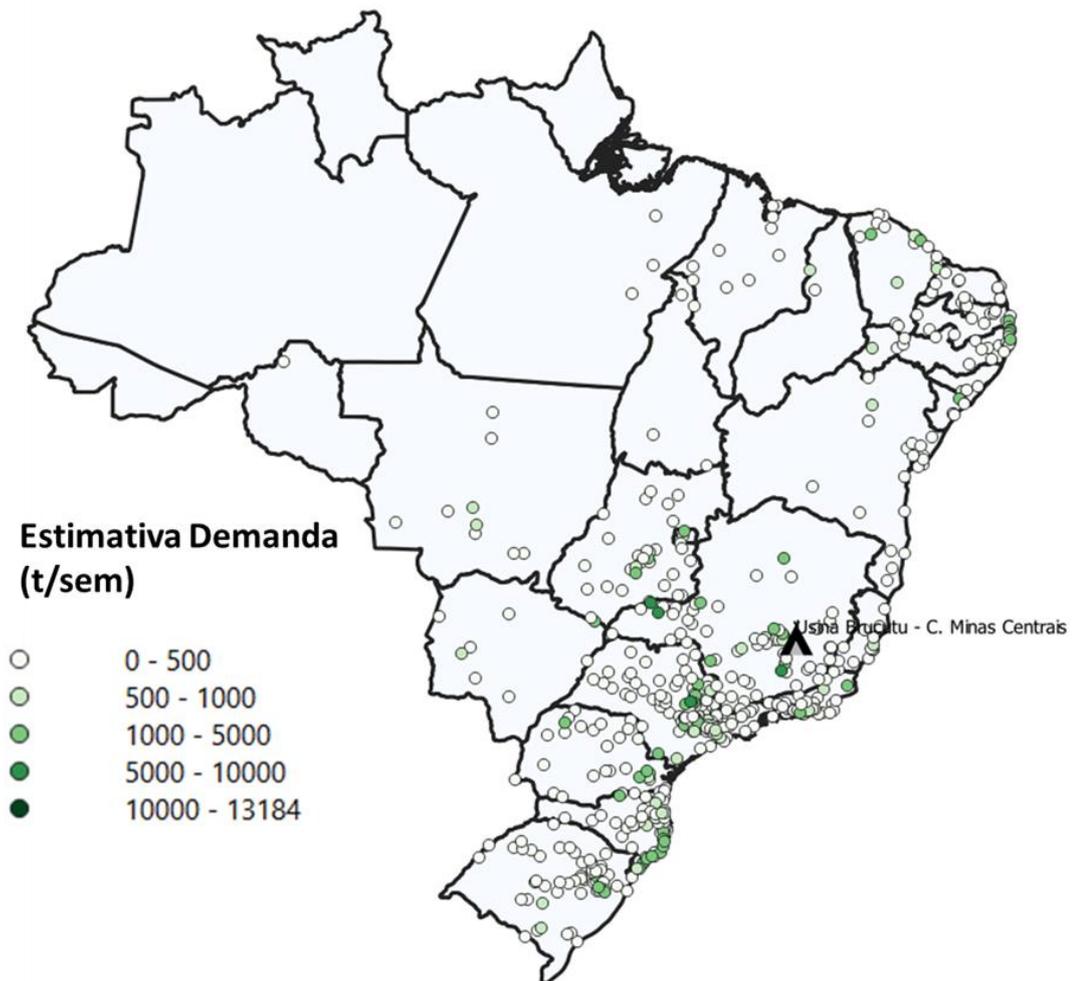


Figura 4-11 – Demanda estimadas de coproduto por cidade em (t/sem)
 Fonte: Adaptado de SNIC (2019a), ABNT (2018), IBGE (2020), Brasil (2007) e QGIS (2020)

A Figura 4-11 evidencia uma concentração de demanda em alguns nichos estratégicos, como o interior de São Paulo, o triângulo Rio-Minas-São Paulo, a faixa litorânea entre Paraná e Santa Catarina, a região Centro-Oeste, em torno do Distrito Federal (DF) e, no Nordeste, em algumas grandes cidades no interior e em capitais na faixa litorânea da Costa Sul da região.

Conforme metodologia adotada, demonstrada no próximo capítulo, as demandas de cerca de 560 cidades foram agrupadas em 106 mesorregiões, representadas na Figura 4-12.

De acordo com o detalhamento realizado na subseção 4.2.2, a substituição do coproduto nos canais considerados acarreta diferentes impactos ambientais e econômicos na cadeia da construção civil. Cada canal mercadológico é formado por diferentes produtos, com constituições físico-químicas e consumos de matérias-primas de fonte não renováveis distintas (Figura 4-9), como argila e calcário. Conforme a localização de cada canal, existe um custo logístico proporcional e, dessa forma, ao considerar esses dois fatores, ainda de acordo uma estratégia estabelecida pela empresa, após uma análise dos 4 *Ps* (Preço, Produto, Praça e Promoção), o preço de venda do coproduto varia segundo o canal de venda e a região, assumindo valores de 125 R\$/t a 225 R\$/t.

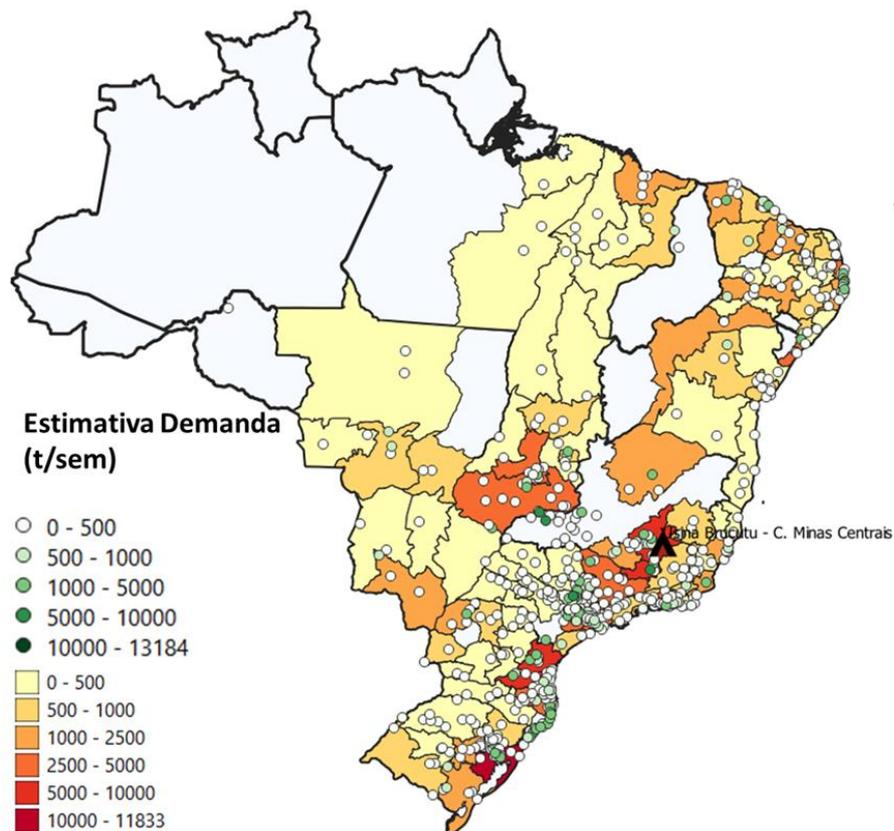


Figura 4-12 – Demanda estimadas de Coproduto por cidade, agrupadas por mesorregião (t/sem)
 Fonte: Adaptado de SNIC (2019a), ABNT (2018), IBGE (2020), Brasil (2007) e QGIS (2020)

As 106 mesorregiões inicialmente consideradas para o desenho do sistema logístico, em conformidade com as principais localizações das cidades onde as fábricas de materiais de construção, foram mapeadas e enumeradas na Figura 4-13. De acordo com levantamento das demandas realizada nesta própria subseção, as regiões em branco, não consideradas, não possuem demanda em potencial expressiva.

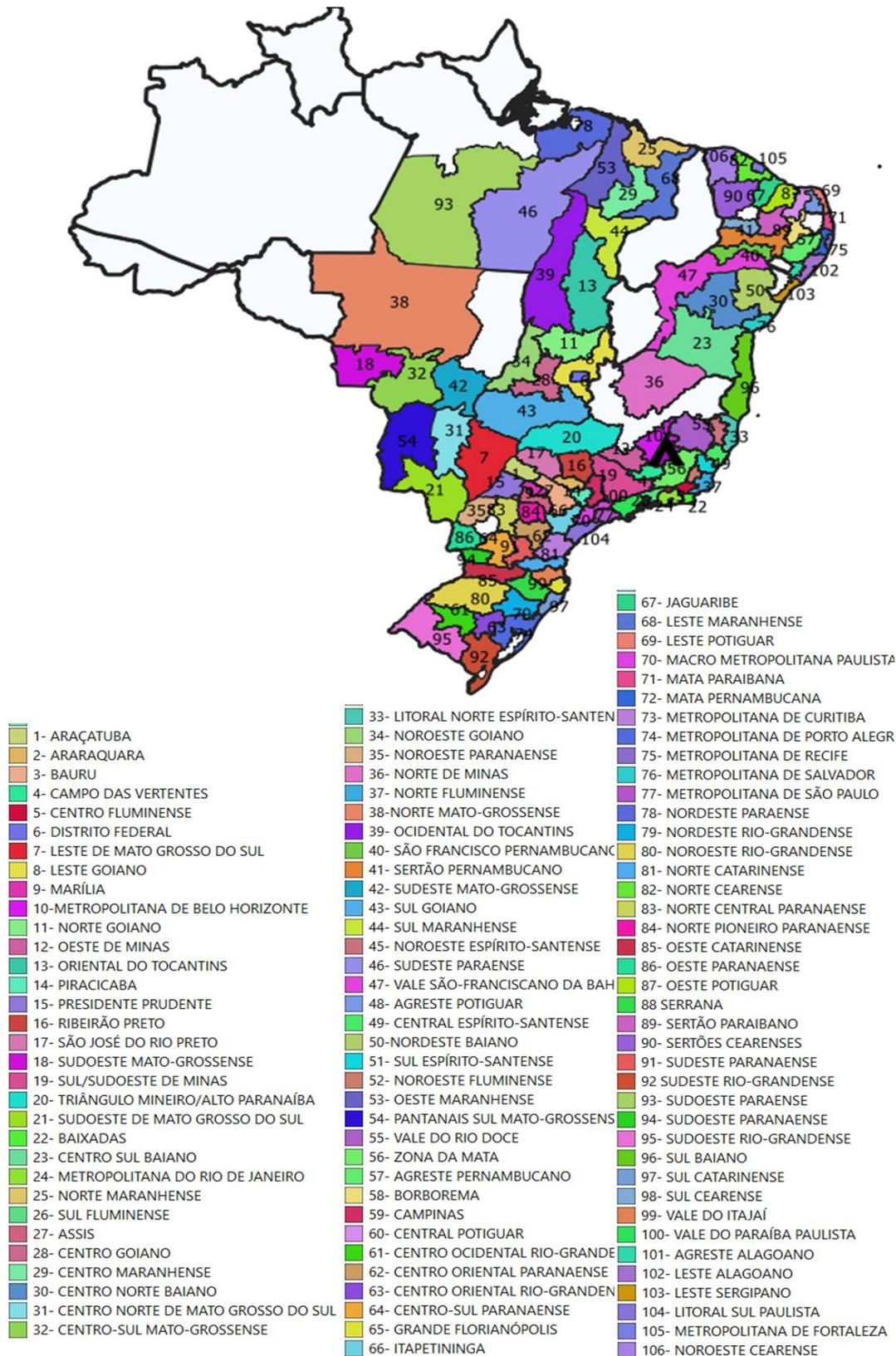


Figura 4-13 – Legenda 106 mesorregiões com demanda em potencial

4.2.1.1 Transporte exclusivo por ferrovia ou de modo combinado com rodovia

Com base em Brasil (2021) e no Apêndice B desta dissertação, a malha ferroviária considerada foi mapeada na Figura 4-14. Para melhor visualização dos benefícios teóricos das integrações intermodais, foram consideradas, além das ferrovias existentes, algumas que estavam “em obras”, segundo arquivo georreferenciado oriundo da declaração da rede da ANTT (2021a).

Dos 670 *hubs* ferroviários disponíveis no sistema de transporte ferroviário (ANTT (2021a)), 217 foram selecionados em razão da maior proximidade com o mercado consumidor, segundo *plugin* do software QGIS (2020), que calcula a distância real do *hub* mais próximo. Em seguida, os *hubs* foram classificados em cinco diferentes grupos, de acordo com o tipo de infraestrutura disponível, adequação à movimentação de granéis sólidos e respectivos custos operacionais.

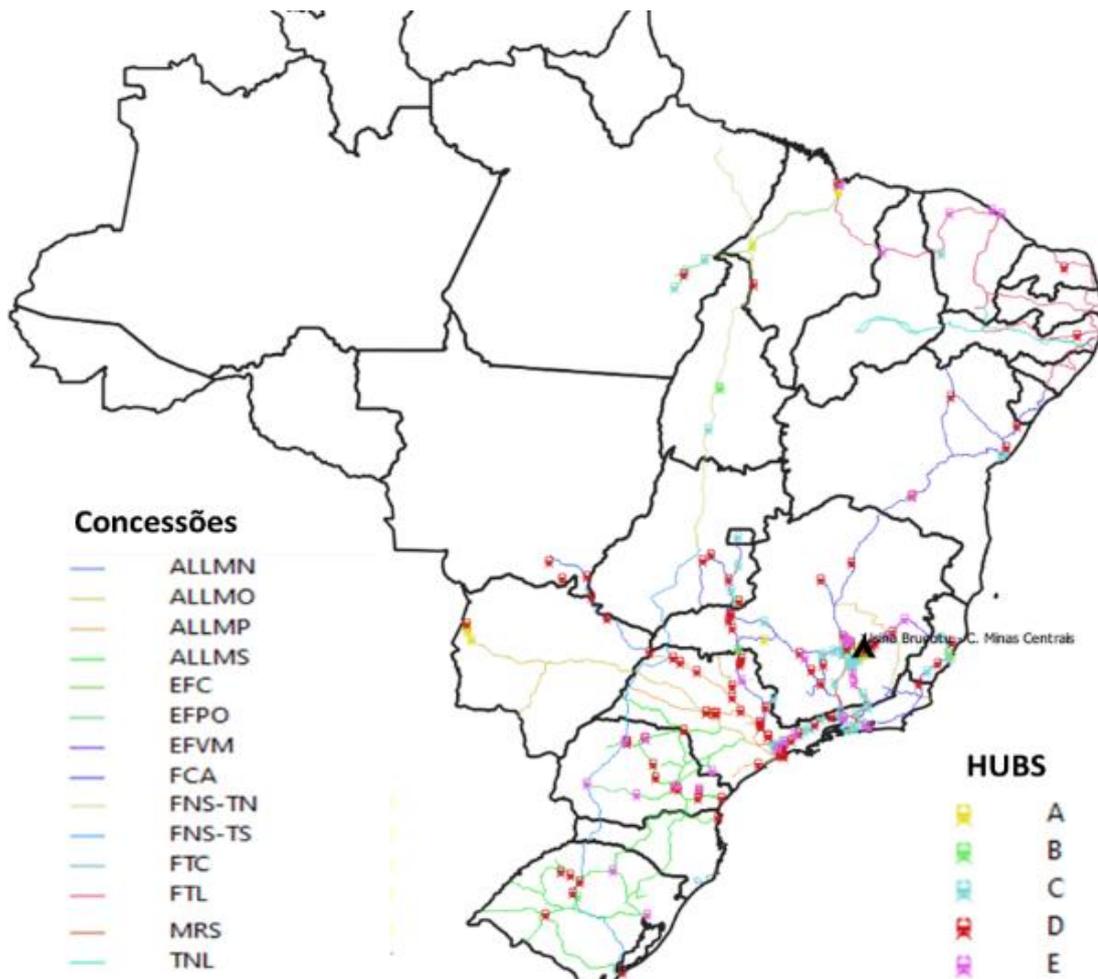


Figura 4-14 – Sistema Logístico Ferroviário – Classificação: alternativas consideradas: A, B, C, D, E
Fonte: Adaptado de Brasil (2021a), ANTT (2022) e QGIS (2020)

Para cada opção representada na Tabela 4-2, considerou-se um custo de transbordo entre os respectivos *hubs*, de acordo com dados de mercado fornecidos pela empresa, e os custos dos *hubs* de carregamento. A classificação foi feita segundo a declaração de rede da ANTT (2022).

Tabela 4-2 – Custo de movimentação dos *hubs* ferroviários considerados

HUBS FERROVIÁRIOS	Quantidade	Classificação segundo DR 2020	Custo de Mov. (R\$/t)
Configuração Carregamento	2	HUB É PRÓPRIO e Adaptado p/ Min	2,4
Configuração A	15	HUB É PRÓPRIO e Adaptado p/ Min	2,4
Configuração B	10	HUB É PRÓPRIO e NÃO Adaptado p/ Min	5,0
Configuração C	61	HUB 3PL e Adaptado p/ Min	7,5
Configuração D	94	HUB 3PL é NÃO Adaptado p/ Min	10,0
Configuração E	35	HUB 3PL e é CIMENTO	5,0
TOTAL HUBS FERROV.	217		

Para a configuração *A*, foram identificados cerca de 15 *hubs* já adaptados para o minério, pertencentes à empresa, o que leva a um custo de frete de transporte ferroviário e movimentação inferior ao cobrado por outras ferrovias. A opção *B* contempla 10 *hubs* próprios, mas que não são adaptados para o minério, sendo considerado um sobre custo de aluguel de equipamentos de movimentação.

Outros 190 *hubs* de operadores logísticos terceirizados foram divididos entre aqueles que já operam com minerais e granéis, podendo absorver a operação com facilidade. Na alternativa *C*, 61 *hubs* e os demais 50 *hubs* remanescentes não são preparados para receber minério (*hubs* de grão), contudo, podem ser adequados com algum custo adicional; a configuração *D*, com 94 *hubs*, e a configuração *E*, com 35 *hubs*, contam com os *hubs* de carregamento das fábricas de cimento, utilizados, nesse caso, para a descarga de coproduto substituinte de parte da matéria-prima. As fábricas de clínquer e cimento foram consideradas como *hubs* de descarga de algumas regiões, já que sua maioria está alocada com acesso direto ou próximo à malha ferroviária.

Com o uso do QGIS (2020), o primeiro passo para o cálculo dos fretes ferroviários foi verificar a distância dos trechos correspondente a cada concessão, pois segundo a ANTT (2021b), o custo de frete varia de acordo com a concessionária. Dessa maneira, quando houve integração de mais de uma concessão, realizou-se o cálculo proporcional, com base na distância percorrida para cada uma delas, além do custo de transbordo quando houve necessidade de troca de bitola, no caso, considerada no *hub* de integração da EFVM com a MRS em Contagem.

No *hub* de integração da EFVM com a FCA, em Santa Luzia (MG), o custo de transbordo não foi considerado, pois as duas malhas têm a mesma bitola. Os cálculos das distâncias e fretes correspondentes ao trecho rodoviário, com origem nos *hubs* ferroviários e destino às cidades correspondentes foram descritos na subseção 4.2.1.4. Para os *hubs*, considerou-se uma capacidade ajustável conforme a necessidade, assim, os gargalos do sistema não foram levados em conta.

As capacidades das linhas de transporte férreas, que restringem todo o sistema logístico multimodal, são as restrições do modelo. Essas capacidades foram obtidas por informações atuais da declaração de rede da ANTT (2022), que foram analisadas por tipo de concessão e de acordo com as capacidades dos gargalos (menores) formadas pelos corredores, conforme descrito na subseção 3.1.3.1. A análise de gargalos foi mapeada no Apêndice E, utilizando fluxograma dos cursos no sistema logístico sobre os corredores analisados, o EFVM Leste, que além de atender às mesorregiões em seu entorno, as conecta aos portos de cabotagem, que atendem as regiões costeiras Sul/Sudeste e Nordeste.

Para os respectivos cálculos da capacidade, as informações obtidas da declaração de rede foram tratadas, pois foram disponibilizadas em pares de trem por dia, conforme cálculo realizado pela metodologia de Colson, adotada pela ANTT (2022) e representada pela fórmula da Figura 4-15.

$$C = K_1 * K_2 * K_3 * \frac{1440}{t_{AB} + t_{BA} + \theta}$$

Onde:

C = Capacidade instalada em pares de trem por dia;

K_1 = Índice de eficiência ligado à manutenção de via permanente;

K_2 = Índice de eficiência ligado à gestão de recursos operacionais;

K_3 = Índice de eficiência ligado ao número de seções de bloqueio;

t_{AB} = Tempo de percurso do pátio A para o pátio B;

t_{BA} = Tempo de percurso do pátio B para o pátio A;

θ = tempo de licenciamento.

Figura 4-15 – Fórmula de Colson: capacidade instalada

Fonte: ANTT (2022a)

Dessa maneira, a menor capacidade de cada corredor analisado foi multiplicada por 7 e, em seguida, pela capacidade de transporte de cada trem que transporta minério de ferro, de cada concessionária investigada e, por fim, multiplicada por um fator de 5% de disponibilidade da linha para tipo de produto, considerando o restante para demais produtos concorrentes, como minério e outros, em conformidade com as negociações acordadas com a empresa com concessionárias.

A malha ferroviária objeto deste estudo para atendimento aos principais mercados de Minas Gerais, do restante do Sudeste e do Brasil, com os respectivos pontos de interconexões entre as diversas operadoras, estão disponibilizadas nos mapas no Apêndice A.

4.2.1.2 Transporte utilizando cabotagem com ferrovia e/ou rodovia

No sistema logístico ilustrado pela Figura 4-16, com base no Apêndice B, foram consideradas duas opções: a alternativa *F*, com operações em quatro *hubs* portuários marítimos, com exploração pertencente à empresa, e a alternativa *G*, com possibilidade do uso de 24 *hubs* portuários terceirizados – portos organizados públicos ou Terminais de Uso Privado (TUP), com tarifas portuárias diferenciadas para cada *hub*, consideradas segundo a localização (ANTAQ, 2002).

Na opção *F*, Tubarão, abastecido pela integração com a ferrovia EFVM e pertencente à empresa, foi considerado o porto de origem, enquanto a opção *G* considerou, para portos no sentido Norte, saída pelo porto da Barra do Riacho em Aracruz (ES), e para os portos no sentido Sul, o porto de Itaguaí (RJ), suprido pela integração da MRS com EFMV, transbordado pelo *hub* de Contagem (Figura 4-16).



Figura 4-16 – Sistema Logístico Aquaviário, tipo Cabotagem, opções F e G
Fonte: Adaptado de Brasil (2021a), ANTAQ (2021) e QGIS (2020)

As distâncias entre portos de origem e destino via cabotagem foram analisadas segundo dados disponibilizados pela ANTAQ (2008). Os portos de Manaus, Santarém, Santana, Barcarena e Belém, apesar de estarem sobre o rio Amazonas, foram considerados como navegação de cabotagem, em conformidade com a ANTAQ (2021).

Os custos operacionais do sistema logístico aquaviário foram descritos na tabela do Apêndice F, de acordo com seu tipo de operação (própria ou terceirizada) e o custo do complemento do trecho rodoviário (na subseção 4.2.1.4).

As tabelas constantes no Apêndice F ilustram os custos logísticos avaliados de acordo com as respectivas tarifas portuárias (porto de origem e destino) de cada porto, atualizadas no *site* da ANTAQ (2002). Dentre eles, estão a tarifa de operação portuária marítima (taxas devidas pelo armador ou agente); tarifa de operação portuária terrestre, movimentação portuária, utilização da infraestrutura de proteção e acesso aquaviário; e o custo de operação de aluguel de equipamentos e mão de obra de movimentação (carga e descarta, todos em R\$/t).

Segundo Simão (2017), os custos de navegação alcançam 12 US\$/t. (1.000 km). O valor do dólar considerado foi de 5,38 R\$/ 1 U\$, do dia 21 de fevereiro de 2021, perfazendo um total de 0,055 R/t km, já que também foi pensada uma provável redução de custo de 15% (GLOBO, 2021), em razão do Projeto de Lei nº 4.199, de 2020, conhecido como BR do Mar (BRASIL, 2021c).

Como os portos cobram suas tarifas de armazenagem de forma distinta (alguns por área e outros por tonelada), para efeitos didáticos, este estudo considerou um custo único para todos os portos, com base na tarifa cobrada pela Companhia das Docas do Espírito Santo (CODESA), no porto de Vitória, sendo que, nos portos de origem, o custo é de 13,4 R\$/t para o período de 30 dias, e para os portos de destino, 4,4 R\$/t para 15 dias de estocagem. As tarifas de operação portuária marítima e terrestre de Vitória sofrem uma redução de 70%, já considerada nas tabelas de custo para transporte por cabotagem.

Alguns TUPs não possuíam tarifas discriminadas nas tarifas portuárias disponíveis pela ANTAQ (2002), dessa forma, foram consideradas as tarifas de portos da região, como o Terminal Portuário de São Luís (TPSL) com o de Barcarena (PA), o de Pecém com o de Fortaleza (CE) e o Terminal Marítimo Inácio Barbosa (TMIB) de Sergipe com o de Maceió (AL).

Os Custos Logísticos Totais (CLT) das opções *F* e *G* são compostos pelos custos logísticos ferroviários, da Usina de Brucutu aos portos de origem, incluindo os custos de

transbordo ferroviário, de 1,90 R\$/t para a opção *F* (própria) e de 2,3 R\$/t para a *G* (terceirizada), em razão do lucro do operador logístico (ANTAQ, 2013c), com valores monetários atualizados pelo IGP-M, da Fundação Getúlio Vargas (FGV), publicado pelo *site* do BCC (2021).

Esse valor foi acrescido do custo logístico do aquaviário, consolidado nas tabelas de custo (incluindo tarifas de movimentação, aluguel de equipamentos, mão de obra e armazenagem) e somado aos custos de transbordo (terceirizado) entre aquaviário e rodoviário na opção *F*, de 5,64 R\$/t. Para a alternativa *G*, o custo de transbordo considerado entre aquaviário e rodoviário foi de 9,0 R\$/t de acordo com valores praticados no mercado nacional de 2020, mais os custos de frete rodoviário entre os *hubs* marítimos até as cidades-destino correspondentes consolidados (subseção 4.2.1.4).

4.2.1.3 Transporte utilizando hidrovias com ferrovia e/ou rodovia

As duas hidrovias consideradas neste sistema logístico baseiam-se nos dados da ANTAQ (2021a), com valores monetários atualizados pelo IGP-M (FGV), do *site* do BCC (2021). Assim, os custos de fretes de navegação foram diferenciados em maiores e menores que 1.000 km (0.041 e 0.111 R\$/t, respectivamente), além dos custos operacionais de transbordo em *hubs* portuários fluviais, de 5,64 R\$/t.

As tarifas portuárias para o sistema fluvial tiveram definição similar àquelas praticadas pela Companhia das Docas (PA), devido às condições operacionais semelhantes (ANTAQ, 2002). Os custos logísticos totais foram consolidados e tabelados por hidrovia (Apêndice F).

Os custos de frete rodoviário entre o *hub* ferroviário de Uberaba e o *hub* hidroviário (origem) de Iturama, e do *hub* portuário fluvial (destino) até as mesorregiões correspondentes foram consolidados em consonância com a subseção 4.2.1.4.

4.2.1.4 Transporte rodoviário

Uma análise preliminar determinou qual o melhor tipo de caminhão, de acordo com seu número de eixos. Assim, foram considerados os diferentes custos da tabela de frete com, no mínimo, cinco tipos de caminhões (*Truck*, *Bi-truck*, Carreta, Bitrem e Rodotrem), conforme Tabela 4-3. A tabela utilizada foi a de letra C, para transporte rodoviário de carga de lotação de alto desempenho para granéis sólidos, de março de 2022 (ANTT, 2022).

Tabela 4-3 – Custos fixos e variáveis das tabelas de piso mínimo

Tabela de Frete Tipo "C"- Granel Sólido - 03/2022				
Tipo de Caminhão	Cap de Carga Liq. (t)	Núm. de Eixos	Desloc. (CCD) R\$/km	Carga e Desc. (CC) R\$
Truck	12	3	3,3906	106,41
Bitruck	18	4	3,9388	115,45
Carreta	27	6	5,1136	130,36
Bitrem	38	7	5,4677	150,02
Rodotrem	50	9	6,2879	158,53

Fonte: Adaptado de ANTT (2022) e Guia do TRC (2020)

Os custos de frete foram estimados para diversas distâncias, tanto com relação ao fixo de carga e descarga quanto à parcela variável, divididos pela capacidade de carga, conforme se observa na Figura 4-17. O Rodotrem demonstrou-se mais eficiente, pois conta com menor custo de frete para pequenas e grandes distâncias.

Mesmo avaliando o fator do pedágio, devido ao maior número de eixos, o custo do Rodotrem é menor para diversas distâncias, logo, para efeitos comparativos com outros sistemas logísticos, considerou-se somente esse tipo de caminhão, que além de um melhor custo, acarreta menor impacto socioambiental, consumindo menos combustível, por km/t, e, conseqüentemente, emitindo menos poluentes.

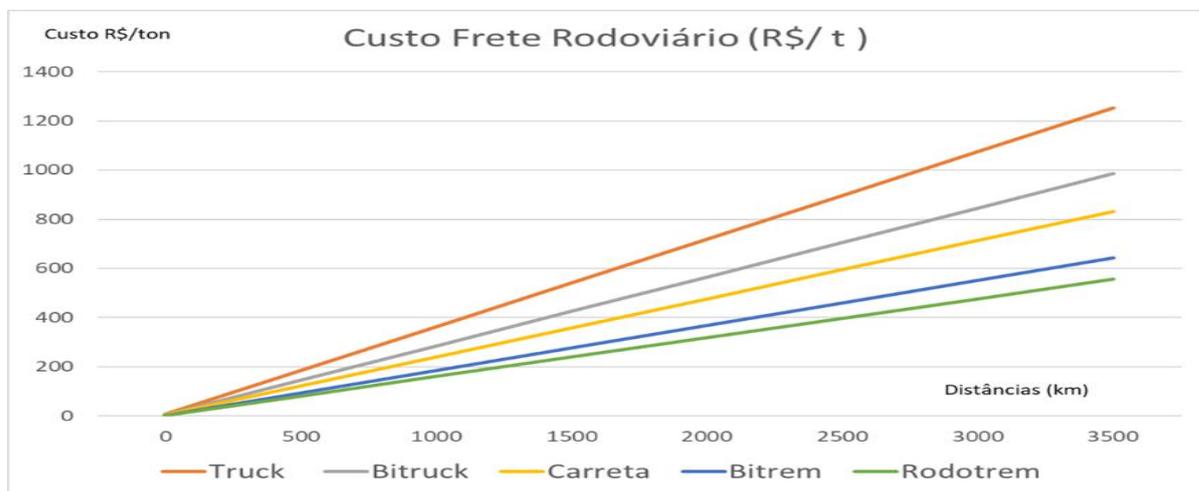


Figura 4-17 – Custo do frete rodoviário em função da distância– granéis sólidos, Tabela “C”

Fonte: Adaptado de ANTT (2022)

A malha rodoviária estabelecida corresponde a uma conjunção de rodovias federais e estaduais. Definidas a partir do ponto de origem único – a usina Brucutu, de acordo com a Figura 4-18 – e categorizadas por estado, as rotas foram extraídas do atual sistema rodoviário (BRASIL, 2021) e georreferenciadas por meio do cálculo do algoritmo do *software* de análise de rede QGIS (2020), que analisou a melhor rota entre origem e cidades destinos.

O Custo Logístico Total do modo rodoviário (CLT Rod) é resultado da soma do Custo de Carregamento em Brucutu e o Custo de Frete rodoviário considerado pela tabela de frete mínimo tipo “C” – “Transporte Rodoviário de Carga de Lotação de Alto Desempenho” (ANTT, 2022).

O tipo de produto avaliado foi o de Granéis Sólidos (GS). O Custo de Frete (CF) é composto por uma parte variável, o Custo Deslocamento (CD), que varia de acordo com a distância, o número de eixos e tipo de produto transportado, e uma parte fixa, o Custo de Carga e Descarga (CC). Esses custos são acrescidos do Custo de Pedágio (CP), de acordo com rota, número e valor de tarifas e número de eixos, calculado com base nos dados de Rotas Brasil (2021), mais a remuneração do operador logístico.

Nesse caso, o lucro do operador considerou 15% do valor do CF rodoviário (sem pedágio). Como o operador logístico é especializado no transporte de minério, a operação estabeleceu frotas específicas, dedicadas ou fidelizadas (ANTT, 2022), portanto, o pagamento de frete de retorno vazio e pedágio (ida e volta) é obrigatório.



Figura 4-18 – Sistema Logístico Rodoviário
Fonte: Adaptado de QGIS (2020)

4.2.2 Impactos gerados na *Supply Chain* do minério de ferro e construção civil

A proposta desta subseção é discutir como essa equação sustentável se configura e como suas principais variáveis se comportam frente ao sistema logístico proposto, seus parâmetros e impactos estabelecidos por meio do levantamento de indicadores sustentáveis. Com isso, é possível alcançar uma ferramenta de auxílio na tomada de decisões, mediante o uso de técnicas de pesquisa operacional para elaboração de um modelo de desenho de sistemas logísticos que objetive o Lucro Total Máximo, com impactos socioambientais prejudiciais – negativos mínimos e impactos socioambientais positivos máximos, que possibilite ainda medir, comparar e conjugar como se relacionam as diferentes variáveis dos parâmetros estabelecidos.

Além disso, o sistema implica, conseqüentemente, na obtenção do desenho de um sistema logístico multimodal de escoamento desses coprodutos para o mercado de construção civil, de forma otimizada em relação aos custos e aspectos sustentáveis, conforme parâmetros a serem discutidos no decorrer desta dissertação.

Cada canal de venda conta com diferentes processos produtivos envolvidos, ocasionando variados impactos ambientais positivos (devido à sua substituição) e negativos, como por exemplo, consumos energéticos de recursos naturais de fontes não renováveis, como combustíveis e pneus, emissões de gases como o CO_2 (GEE) e Poluentes Atmosféricos (PA), além das emissões de resíduos sólidos e líquidos (detritos de pneus, perdas (sujeidades), e vazamentos de óleos. Sob outra ótica, há impactos sociais positivos, como contribuição para o PIB, novas contratações e negativos, como por exemplo, acidentes com vítimas fatais, incômodos causados pelos ruídos dos sistemas logísticos e sujeidades das perdas de transporte.

A gestão sobre os impactos gerados, as chamadas externalidades pelas atividades de transporte, está ganhando cada vez mais importância nas decisões tomadas. De acordo com a pesquisa realizada pela *Global Network of Director Institutes* (GNDI, 2021), os sistemas gerenciais estão, cada vez mais, incorporando a filosofia *Environmental, Safety and Governance* (ESG), que é uma avaliação da consciência coletiva de uma empresa em relação aos fatores sociais e ambientais.

O grande ganho ambiental com essa substituição parcial está em, além de evitar barragens – o que seria um ganho direto para a mineradora –, ganhos em outras cadeias, indiretos. Assim, em consonância com Formentini e Taticchi (2016), os impactos positivos e negativos gerados nas três esferas têm influência em diversos níveis, segundo a ótica das três

esferas da sustentabilidade. Para este estudo de caso de substituição, os impactos gerados nas diferentes cadeias e sistema logístico foram esquematizados na Figura 4-19.

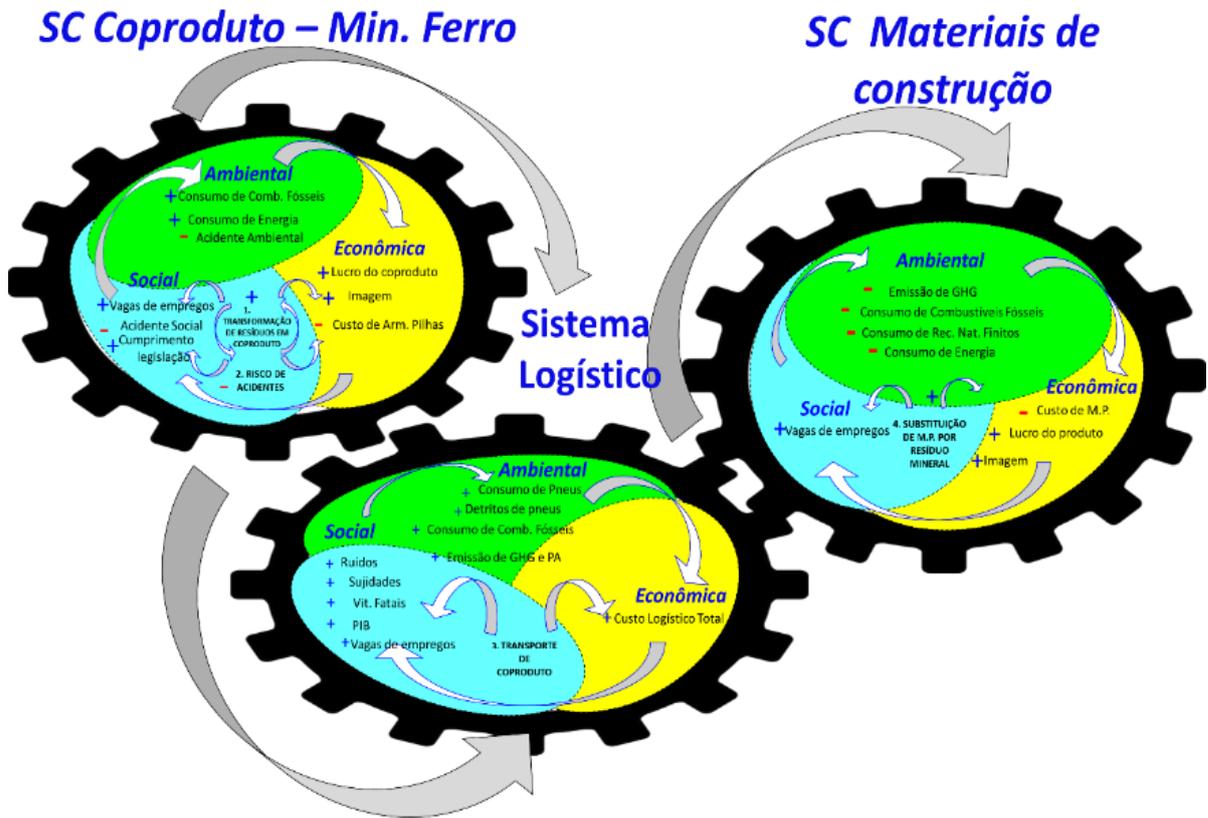


Figura 4-19 – Esferas de Sustentabilidade envolvidas no projeto
 Fonte: Adaptado de Carter e Rogers (2008)

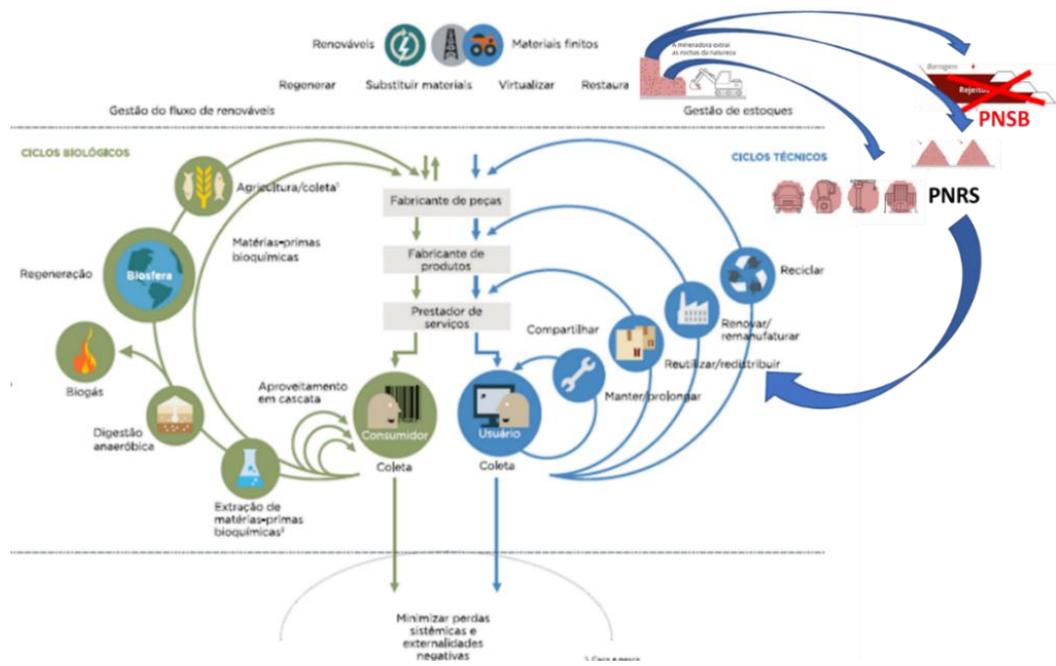


Figura 4-20 – Modelo Geral de Economia Circular adaptado para caso do uso de coprodutos da extração e beneficiamento do minério de ferro como substituintes de matérias-primas de materiais de construção
 Fonte: Adaptado EMF (2021)

Para Guarnier (2014), a avaliação do ciclo de vida (ACV) é conhecida pela expressão do berço à cova (“*Cradle to Grave*”) em uma cadeia de distribuição direta, mas na cadeia que possui uma logística reversa, pode ser chamada, segundo McDonough e Braungart (2002), do Berço ao Berço (“*Cradle to Cradle*”), cuja proposta é, ao invés de destruir o meio ambiente, alimentar o ciclo biológico da Terra e o ciclo tecnológico das indústrias. Dessa maneira, o que não puder ser consumido pelo meio ambiente deve ser quebrado em elementos que possam ser reabsorvidos pelas indústrias como matérias-primas de qualidade.

Os impactos gerados pelo uso dos rejeitos como coprodutos, que ao invés de serem armazenados em barragens na cadeia do minério de ferro e da construção civil (adaptado do modelo da Figura 4-20 e representado na Tabela 4-3), estão baseados em uma ACV simplificada, que considera todas as externalidades nos âmbitos social e ambiental, e podem ser classificados como positivos ou negativos, de acordo com o tipo de impacto. Os principais impactos foram consolidados na Tabela 4-4.

Segundo Mattos (2001), os impactos ambientais são categorizados de acordo com o meio físico no qual a poluição está sendo gerada (ar, água ou solo) e com a amplitude do impacto, que pode ser local, regional ou global. Os impactos ambientais têm como base a pesquisa bibliográfica de Leal Junior (2010), sendo que os principais impactos ambientais aplicados a este caso são consumo de energia e materiais, além de emissões de Gases do Efeito Estufa, emissões de Poluentes Atmosféricos, , resíduos sólidos e líquidos, além dos impactos sonoros – ruídos.

Alguns impactos ambientais causam danos diretos à sociedade e foram considerados impactos sociais. A abrangência dos impactos sociais do transporte é proporcional à importância da economia para o setor (CASTRO, 2013). Essa importância pode ser refletida na criação de novas oportunidades de empregos (ESKANDARPOUR et al., 2015), contribuição direta para o PIB, aumento de vítimas fatais de acidentes, sujeidades causadas pelas perdas ao longo do caminho, ou ainda incômodos causados pela poluição sonora para a sociedade.

Os impactos considerados para este novo processo ainda estão alinhados em conformidade com as diretrizes do Banco Mundial propostas no relatório de mobilidade, *Sustainable Mobility for All* (2017), e com os princípios de conservação do meio ambiente e sociedade estabelecidos pela Lei nº 10.233, de 5 de junho de 2001, que trata da reestruturação dos meios de transporte aquaviários e terrestres (BRASIL, 2001b), e com a própria Constituição Federal e Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), Lei nº 6.983 (BRASIL, 1981).

Tabela 4-4 – Impactos gerados na SC do Minério de Ferro e da SC da Construção Civil

NÍVEL		3Ps- 3 Esferas de Elkington, 1994	Parametros quantitativos e qualitativos do projeto	Impacto
SC Minério de Ferro	Empresa	ECO	Imagem da empresa Custo de Arm. Em barragens Seguro, Multas e indenizações Valor - Receita do Coproduto Cumprir a legislação PNRS - Evitar novas barragens	Positivo Negativo Negativo Positivo
		SOC	Risco de Acidente social Novas contratações Contribuição para o PIB	Positivo Positivo Positivo
		AMB	Risco/Impacto de Acidente Ambiental	Positivo
	Sistema logístico	ECO	Custo Logístico Total (CLT) Novas contratações	Negativo Positivo
		SOC	Contribuição para o PIB Número de vítimas fatais em acidentes Perdas e sujidades nas proximidades Impactos sonoro nas proximidades	Positivo Negativo Negativo Negativo
		AMB	Emissões de CO2 e Poluentes Atmosféricos Consumo de combustíveis fósseis Consumo de pneu Detritos de pneus (Carbono Negro) Vazamento de óleo	Negativo Negativo Negativo Negativo Negativo Negativo
SC Construção Civil (Clinker, Cerâmica Vermelha e Concreteiras)	SOC/ECO/AMB	Consumo de Rejeito / Substituição de Rejeito em matéria primas da CC Consumo matéria primas de fonte não renováveis (Argila e Calcário) Consumo de Energia/combustíveis fósseis nos fornos e na extração das matérias primas	Positivo Negativo Negativo	
	ECO	Emissão de CO2 nos fornos e na extração das matérias primas e calcinação Custo de M.P. Imagem da empresa Consumo de Energia Combustíveis Fósseis Emissões de CO2 e Poluentes Atmosféricos	Positivo Positivo Positivo Positivo Positivo	

Fonte: Adaptado de Elkington (1994)

Como citado por Elkington (1994), os novos processos têm diferentes impactos, positivos ou negativos, e devem ser avaliados sob a ótica das três esferas. Esses impactos podem ser medidos e controlados por indicadores, corroborando com a frase célebre de William Edwards Deming: “O que não pode ser medido, não pode ser gerenciado”.

No contexto esboçado, que envolve características mercadológicas, como o aumento da concorrência decorrente da globalização e o aumento da importância do desenvolvimento sustentável em diversos níveis da sociedade e da busca de mais transparência ao longo das *Supply Chains*, novos sistemas de gestão e tomadas de decisões incorporam práticas ESG com a inclusão das normas do *Global Report Initiative* (GRI, 2007), criadas em 1997 para padronizar a forma de medir, avaliar e relatar os impactos econômicos, ambientais e/ou sociais.

Porém, somente a partir de 2005, a filosofia ESG ganhou peso na América Latina, com a adesão de várias organizações, pois passou a ser uma prática empresarial mundialmente aceita desde então para estabelecer a métrica sobre os impactos gerados pelas atividades das empresas de forma padronizada. Essa prática é uma linguagem comum para os *stakeholders* e organizações, tendo em vista o desenvolvimento sustentável, e proporciona maior transparência

nas *Supply Chains* para o mercado em geral, propiciando uma prestação de contas mais assertiva por parte das organizações para com os *shareholders* e a sociedade em geral.

Na tentativa de obter opções de modais de transporte mais racionais, objetiva-se uma redução de custos logísticos relacionados ao transporte, aliados a uma tentativa de melhoria do nível de serviço ofertado ao cliente (NOVAES; ALVARENGA, 1994). Portanto, sob essa perspectiva, paralelamente à visão de considerar os aspectos sustentáveis para auxiliar a tomada de decisão na determinação e desenho de sistemas logísticos multimodais, Novaes (1986), com uma abordagem voltada à ótica de custo/benefício, sugere que as variáveis que compõem o nível de serviço podem ser classificadas em quatro grupos: o primeiro se refere ao tempo; o segundo, aos custos; o terceiro, aos aspectos relativos à segurança; e o quarto, ao conforto e à conveniência do modo de transporte escolhido.

Tanto a classificação de Novaes (1986), que foi equiparada às esferas de Elkington (1994) e relacionada aos respectivos impactos na engrenagem do sistema logístico, transcritas na Tabela 4-5, quanto os artigos de referência, serviram de base para todas as considerações tecidas sobre a análise do ciclo de vida do produto aplicada ao sistema logístico.

Sob a perspectiva de Novaes (1986), o aspecto relativo ao tempo está presente nas três esferas, uma vez que está intrinsecamente relacionado à produtividade que, por sua vez, interfere em aspectos relativos ao custo logístico diretamente ligados à esfera econômica, mas que impactam as demais. O aspecto voltado para a questão de segurança equipara-se ao âmbito social e se refere ao número de acidentes ocorridos no sistema de transportes envolvido. Por fim, o aspecto relacionado ao conforto foi relacionado às esferas ambientais.

Nesse cenário, os impactos ora mencionados, positivos e negativos, integram a Tabela 4-5 no nível corporativo, mais especificamente no que refere ao seu sistema logístico e empresas de materiais de construção, e foram aplicados para comparar as diversas alternativas intermodais dos sistemas logísticos propostos.

Salienta-se, portanto, que as bases norteadoras para a construção dos indicadores sustentáveis aplicáveis a este projeto residem nas variáveis de Novaes (1986) sobre a ótica de Elkington (1994), aliadas a alguns aspectos propostos na aplicação de variáveis quantitativas e qualitativas (LAMBERT et al., 1998) e alguns requisitos do *Global Report Initiative - GRI* (1997).

Alguns impactos e seus respectivos indicadores não se relacionam diretamente ao sistema logístico e acontecerão independentemente do tipo de transporte. A melhoria da

imagem da empresa, o cumprimento dos aspectos legais, como a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) e Política Nacional Segurança de Barragens (PNSB), a criação de empregos nas usinas e a diminuição dos riscos de acidente ambiental e social no que se refere ao rompimento de barragens não foram considerados para determinar o sistema logístico ideal, nem os impactos gerados na cadeia de construção civil.

De acordo com a ANTT (2022), da mesma forma que os custos de frete foram contemplados na ida e na volta, pois trata-se de um tipo de transporte especializado, os impactos socioambientais também consideraram o mesmo percurso.

Tabela 4-5 – Relação dos indicadores de impactos socioambientais positivos e negativos

Nível	Parâmetros Sustentáveis	Elkington, 1994	OBJETIVO	Unid.	Leis e Regulamentações	Artigos de referência
Supply Chain - Min. de Ferro	Custo Logístico Total	ECO	MIN	\$/ tku		Soncim, (2002); Pinheiro and Marujo, (2012); Ambrosino e Scutellà (2005); Ferrari (2006)
	Custo Logístico Sustentável Total	ECO/AMB/SOC	MIN	\$/ tku		Zhang et al. (2017); Sadegheh et al. (2010),
	Novas contratações	SOC	MAX	N. vagas/tku	GRI (1997); ISO, (2010);	Eskandarpour et al. (2015); Pishvae et al. (2012); IBGE (2021); , CNT, (2021b); MTE, (2021); CNT, (2020)
	Contribuição para o PIB	SOC	MAX	\$/ tku	GRI (1997)	CNT (2019a); CNT (2019b) ;ILOS (2018); FGV (2020);
	Vitimas fatais de acidentes	SOC	MIN	Mortes/tku	GRI (1997)	EPL (2019c); (Dalmás, 2008); Leal Junior (2010); EPL (2021); CNT, (2020). EPL, (2021b)
	Perda/Sujidades	SOC	MIN	t/ tku	GRI (1997)	Verbete (2013); Juliá (2010); Dalmás (2008)
	Poluição Sonora	SOC	MIN	Dbs/tku	CONAMA (1998); ABNT (2019); BRASIL (2001); Agenda 21 (1992); OMS et al. (2011); GRI (1997); Sustainable Mobility for All, (2017)	Carvalho Jr. et al. (2016); Melo (2015); Milan (2007); CE Delft (2007); CE Delft et al. (2019); Castro (2013); Souto et al. (2018); Dalmás, (2008); Melo (2015); UIC (2010).
	Emissões de CO2	AMB	MIN	g/ tku	Agenda 21 (1992) ; protocolo de Quioto em 1997; ONU, (2015); GRI (1997).	Mannion (2014); Mattos (2001) ; Ferreira et al., (2020); Leal Junior, (2010); IEMA, (2020); (EPL, 2019); Piecyk and McKinnon (2010); Zhang et al. (2017)
	Emissão de PAs	AMB	MIN	g/ tku	CONAMA (1989); CONAMA, (2018);; GRI (1997).	CONAMA (1989); CONAMA, (2018); Mattos (2001); Leal Junior (2010)
	Consumo de Comb. fósseis	AMB	MIN	l/ tku	Agenda 21 (1992) ; protocolo de Quioto em 1997; ONU, (2015); GRI (1997).	Mattos (2001); IEMA (2020); : EPL (2019); Alvarenga (2010); GUIA DO TRC, (2020)
Consumo de pneu	AMB	MIN	N. pneus/tku	PNRS – Política Nacional Resíduos Sólidos, BRASIL, (2010); GRI (1997).	GUIA PNEUS (2019)	
Detritos de pneus (CN)	AMB	MIN	Kg/ tku	Constituição Federal e PNMA, CETESB, (2014); Política Estadual de Mudanças Climáticas – PEMC, (2009); GRI (1997).	Leal Junior, (2010); Lequy et al., (2021); Mulha et al., (2006); Bond et al. (2013); . Jacobson (2004) ; Kopp et al., (2009);	
Vazamento de óleo	AMB	MIN	l/ tku	Constituição Federal e PNMA, a Lei n. 6983, BRASIL (1981) ; SABESP (2007); CONAMA (2005); GRI (1997).	Leal Junior, (2010);; National Waterways Foundation (2012)	

Fonte: Adaptado de Novaes (1986), Elkington (1994) e Lambert et al. (1998)

4.2.2.1 Impactos ambientais negativos – prejudiciais

4.2.2.1.1 Consumo de combustível – óleo diesel/petróleo

Os principais combustíveis consumidos pelo setor de transportes têm como origem o petróleo, combustível fóssil mais utilizado no mundo (IEMA, 2020). Devido à sua característica energética e por ser de fonte não renovável, o petróleo é um recurso estratégico de fundamental importância econômica e política para toda a sociedade.

Trata-se de um recurso básico da sociedade industrial contemporânea com aplicação em diversos setores, sendo o setor de transportes o seu maior consumidor. Segundo Mattos (2001), esse segmento é responsável pelo consumo de cerca de 60% de todo petróleo produzido; os outros 40% são utilizados pela indústria como fonte de energia, entre outros. Logo, mesmo que o consumo de combustível já esteja embutido na contabilização do custo de frete logístico, ele deve ser paralelamente monitorado em razão de sua grande importância geopolítica.

Além do consumo das reservas não renováveis desse recurso natural, o petróleo é o principal combustível consumido na matriz e está diretamente ligado às emissões de gases do efeito estufa e poluentes atmosféricos, conforme dados consolidados no Balanço Energético Nacional do Ministério de Minas e Energia (IEMA, 2020), representados pela Figura 4-21.

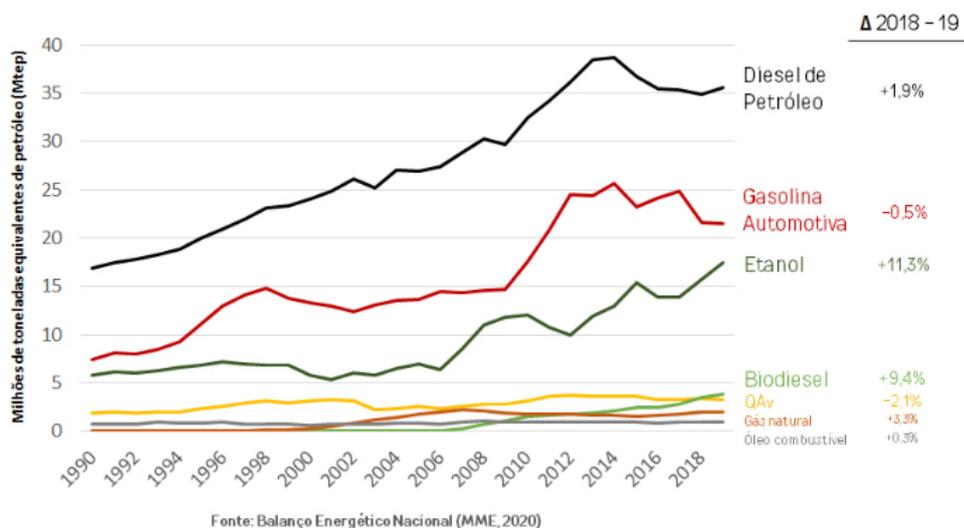


Figura 4-21 – Consumo de Combustíveis no Transporte 1990-2019
Fonte: IEMA (2020)

No segmento de transportes, o transporte rodoviário é o maior consumidor de combustível. De acordo com Mattos (2001), cada modo de transporte apresenta uma intensidade energética, consumindo determinada quantidade de energia para realizar um trabalho (Figura

4-22). Os parâmetros de consumo também podem variar segundo a idade da frota (estado de conservação), o tipo de combustível utilizado, as tecnologias e a gestão.

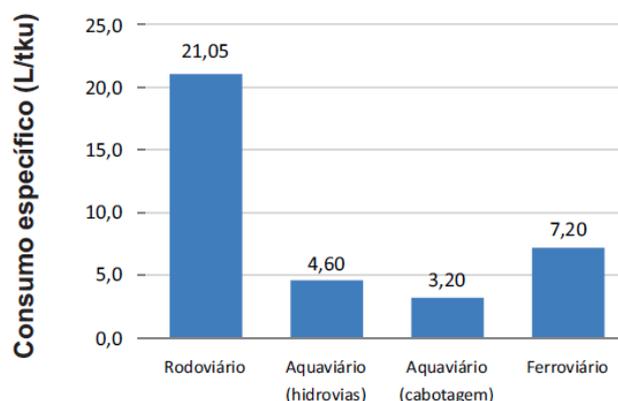


Figura 4-22 – Consumo de combustível por modais de transporte – óleo diesel (l/tku)
Fonte: EPL (2019)

Para dados relativos ao consumo de combustível e emissões dos demais sistemas logísticos, foram considerados dados nacionais em razão de características próprias, como idade média da frota e tipo de combustível utilizado (EPL, 2019), representados pela Figura 4-22.

Dando continuidade à análise inicial de custos de frete para o transporte rodoviário, abordada na subseção 4.2.1.4, com o objetivo de determinar o tamanho ideal do caminhão a ser utilizado, foram considerados os dados levantados por Alvarenga (2010), que compara as diferentes capacidades de acordo com a categoria (número de eixos), conforme se observa na Tabela 4-6.

Tabela 4-6 – Consumo de óleo diesel relativo (km/l.t) a capacidade de carga e número de pneus por tipo de caminhão

OPÇÃO	Tipo de caminhão	Capacidade de Carga Líquida (t)	Número de eixos	Número de pneus	n. Pneu/ ton	Consumo (km/l)	Cons. / ton (km/l.t)
11	Truck	12	3	18	1,5	5,3	0,44
12	Bitruck	18	4	20	1,1	4,4	0,24
13	Carreta	27	6	22	0,8	2,8	0,10
14	Bitrem	38	7	26	0,7	2	0,05
15	Rodotrem	50	9	34	0,7	1,5	0,03

Fonte: Adaptado de Alvarenga (2010) e Guia do TRC (2020)

O consumo de combustível relativo à carga útil transportada é menor em caminhões com mais eixos, como na comparação entre o Rodotrem e o *Truck*. Dessa forma, confrontado com outros sistemas logísticos, o Rodotrem tem menor custo de frete e acarreta menor impacto ambiental, como no caso do consumo de combustível e consequentes emissões de GEE e PA.

4.2.2.1.2 Emissões de gases do efeito estufa (GEE)

O CO_2 é um dos principais componentes resultantes da queima direta dos combustíveis fósseis, porém, não é necessariamente classificado como poluente direto, já que se trata de um gás derivado do próprio processo natural, como a respiração dos seres vivos.

Sabe-se que, na atmosfera, acima de determinados níveis, esse composto se torna tóxico ao ser humano e é um dos gases responsáveis por aumentar o efeito estufa, causando mudanças climáticas como o aquecimento global e as chuvas ácidas (MANNION, 2014).

Segundo Mattos (2001) e Zhang et al. (2017), o setor de transporte é o grande responsável por emissões gases que afetam o efeito estufa, pois além de serem um agente catalizador de mudanças climáticas, podem causar danos à saúde dos seres humanos e demais seres vivos. Piecyk e McKinnon (2010) estimam que o setor de logística contribui com 5,5% da emissão de gases do efeito estufa, sendo 93% relacionados ao transporte e 7%, às movimentações de carga e descarga (*warehousing*).

O impacto causado pelas emissões de CO_2 tem efeito acumulativo e pode ter abrangência local, regional e global. Pode ainda causar efeitos dinâmicos ao longo do tempo, como mudanças climáticas e chuva ácida. O monitoramento e controle de emissões de CO_2 foi um dos temas tratados pela Agenda 21 (1992) e pelo protocolo de Quioto, em 1997, que estabelece metas de redução e prazos.

Recentemente, ações contrárias à mudança global do clima integram os 17 objetivos do desenvolvimento sustentável estabelecidos pela ONU (2015). Assim, o impacto de emissão de GEE tem ganhado cada vez mais importância, seja no meio acadêmico ou no empresarial, tanto que uma precificação de emissões de CO_2 já foi aberta no mercado global.

De acordo com uma pesquisa realizada por Ferreira et al. (2020), em 2016, a participação do setor norte-americano alcançava 28,5% de todas emissões do grupo de energia; no Brasil, a participação do setor de transportes no grupo de energia e processos industriais era de 33%, conforme indicação de Leal Junior (2010), porém, com dados relativos ao início do ano 2000. Informações mais recentes indicam que o transporte rodoviário nos últimos 20 anos elevou a participação brasileira nesse *ranking* para quase 38% (IEMA, 2020), como demonstrado na Figura 4-23.

Dentre as fontes de emissão de gases de efeito estufa, o setor de transportes é o que cresce mais rapidamente (MATTOS, 2001), sendo que o transporte rodoviário de cargas é

responsável por cerca de 80% do total do setor (LEAL JUNIOR, 2010). Nota-se uma semelhança no comportamento da curva de consumo de combustíveis da Figura 4-21 e de emissões do setor de transportes da Figura 4-23. Essa relação existe porque uma das principais causas das emissões de dióxido de carbono CO_2 é a queima de combustíveis fósseis (MATTOS, 2001).

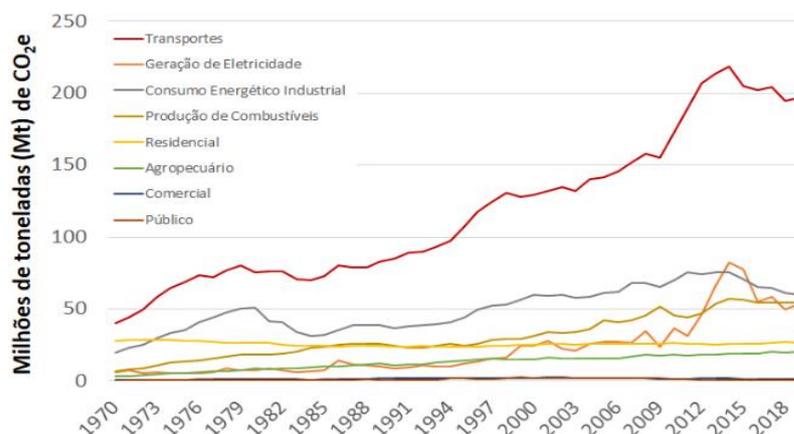


Figura 4-23 – Emissões nas atividades do Setor de Energia (1970-2019)

Fonte: IEMA (2020)

O setor de transporte de cargas representa a maior parte das emissões, principalmente aquelas relativas ao sistema de transporte rodoviário, como demonstrado na Figura 4-24.

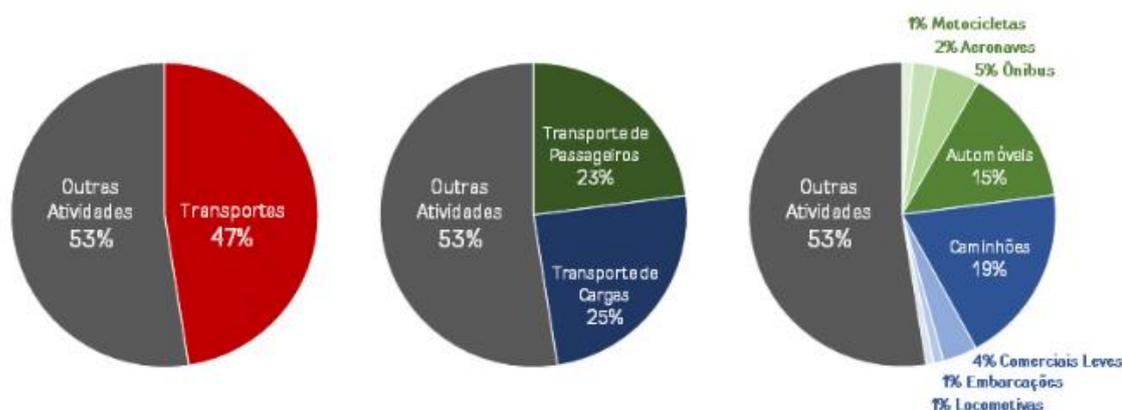


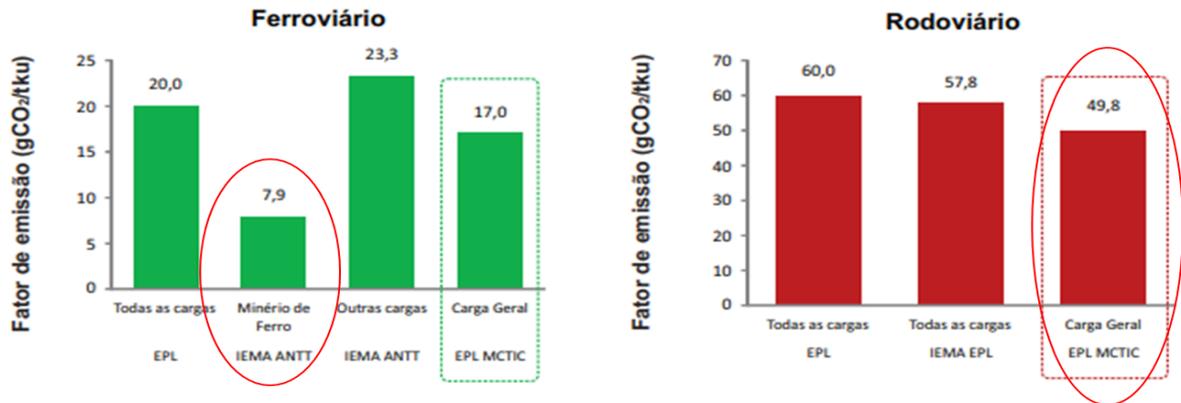
Figura 4-24 – Emissões por modos de transporte do Setor de Energia em 2019

Fonte: IEMA (2020)

Os parâmetros de emissões de CO_2 considerados, representados na Figura 4-25, foram os mesmos utilizados na Metodologia EPL-IEMA para emissões de GEE e Poluentes Locais discriminadas pela EPL (2019). Esses parâmetros avaliam as características inerentes da operação logística brasileira, como idade média da frota dos diferentes sistemas de transporte

ou tipo de combustível usado para comparação da emissão em diferentes tipos de sistemas de transporte.

Novos fatores de emissão em termos de movimentação (gCO₂/tku):



Novos fatores de emissão em termos de movimentação (gCO₂/tku):

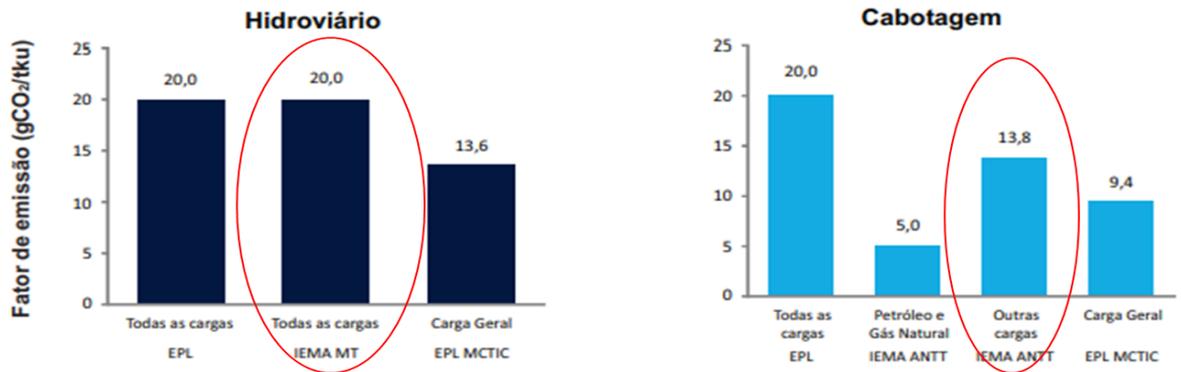


Figura 4-25 – Emissão de GEE (equivalente CO₂) por sistema de transporte (t CO₂/TKU).

Fonte: EPL (2019)

4.2.2.1.3 Poluentes atmosféricos (PA)

Além do CO₂, os transportes são responsáveis pela emissão de poluentes atmosféricos (PA), que podem ser agravados pelas más condições de veículos e vias, adulteração de combustível, tipos de tecnologia empregada e formas de gestão operacional. A suspensão da poeira dada pela movimentação do transporte nas redondezas de suas vias não foi considerada nesse estudo, somente o que é emitido dos meios de transporte.

Segundo Leal Junior (2010), pautado pelas diretrizes da Resolução CONAMA (BRASIL, 1989), a poluição atmosférica é formada por gases, sólidos e aerossóis líquidos em uma quantidade que excede o limite da capacidade de dissipação pela atmosfera, e que traz como resultado danos à saúde de seres humanos, flora e fauna, e à segurança e bem-estar da população. Os efeitos causados pelos poluentes CO, NO_x, hidrocarbonetos (HC), materiais

particulados (MP), SOx e aldeídos podem ser locais, regionais ou globais, podendo causar poluição da atmosfera e chuva ácida (MATTOS, 2001).

Atualmente, os padrões de qualidade do ar são regidos segundo a nova Resolução CONAMA (BRASIL, 2018), que considera como referência os valores-guia de qualidade do ar recomendados pela Organização Mundial de Saúde em 2005. Alguns prováveis efeitos sobre a saúde humana, por tipos de poluentes, foram consolidados por Mattos (2001) na Tabela 4-7.

Tabela 4-7 – Fontes, características e efeitos dos principais poluentes na atmosfera

Poluente	Características	Fontes principais	Efeitos gerais sobre a saúde
Partículas totais em suspensão (PTS)	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Faixa de tamanho < 100 µm.	Processos industriais, veículos motorizados (exaustão), poeira de rua ressuspensa, queima de biomassa. Fontes naturais: pólen, aerossol marinho e solo.	Quanto menor o tamanho da partícula, maior o efeito à saúde. Causam efeitos significativos em pessoas com doença pulmonar, asma e bronquite.
Partículas inaláveis (MP 10) e fumaça	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Faixa de tamanho < 10 µm.	Processos de combustão (indústria e veículos automotores), aerossol secundário (formado na atmosfera).	Aumenta o número de atendimentos hospitalares e de mortes prematuras.
Oxidos de enxofre (SO _x)	Gás incolor, com forte odor, semelhante ao gás produzido na queima de palitos de fósforo. Pode ser transformado a SO ₃ , que na presença de vapor de água, passa rapidamente a ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄). É um importante precursor dos sulfatos, um dos principais componentes das partículas inaláveis.	Processos que utilizam a queima de óleo combustível, refinaria de petróleo, veículos a diesel, produção de polpa e papel.	Causa desconforto na respiração, provoca doenças respiratórias, agrava doenças respiratórias e cardiovasculares já existentes. Pessoas com asma, doenças crônicas do coração e pulmão são mais sensíveis ao SO ₂ .
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	Gás marrom avermelhado, com odor forte e muito irritante. Pode levar a formação de ácido nítrico, nitratos (o qual contribui para o aumento das partículas inaláveis na atmosfera) e compostos orgânicos tóxicos.	Processos de combustão envolvendo veículos automotores, processos industriais, usinas térmicas que utilizam óleo ou gás, incinerações.	Aumenta a sensibilidade à asma e à bronquite, baixa a resistência às infecções respiratórias.
Monóxido de carbono (CO)	Gás incolor, inodoro e insípido.	Combustão incompleta em veículos automotores.	Altos níveis de CO estão associados a prejuízo dos reflexos, da capacidade de estimar intervalos de tempo, do aprendizado, do trabalho e visual.
Aldeídos (R-COH)	São compostos orgânicos que possuem o radical aldeído, ou seja -HC=O.	Formados nos processos de combustão de veículos automotores que usam álcool hidratado.	Causa irritação dos olhos, nariz e garganta. É agente carcinogênico.
Ozônio troposférico (O ₃)	Gás incolor, inodoro nas concentrações ambientais e o principal componente da névoa fotoquímica.	Não é emitido diretamente à atmosfera. É produzido fotoquimicamente pela radiação solar sobre os óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis.	Irritação nos olhos e vias respiratórias, diminuição da capacidade pulmonar. Exposições a altas concentrações podem resultar em sensações de aperto no peito, tosse, chiado na respiração. O O ₃ tem sido associado ao aumento de admissões hospitalares.
Hidrocarbonetos (HC)	São compostos orgânicos formados por átomos de carbono e hidrogênio.	Combustão incompleta em veículos automotores, evaporação no cârter e evaporação no abastecimento.	Considerados carcinogênicos e mutagênicos. Provocam irritação nos olhos, nariz, pele e aparelho respiratório.

Fonte: a partir de Cetesb (2000).

Fonte: Mattos (2001)

Os parâmetros de emissão de poluentes atmosféricos dos modos de transporte aquaviário e ferroviário basearam-se em padrões americanos, pois apresentam semelhanças operacionais de tipo veículo, combustível e idade da frota, enquanto o modo de transporte rodoviário foi baseado nos padrões brasileiros, que difere do padrão americano, como idade de frota, tipo de combustível, tecnologia e gestão. Esses parâmetros, consolidados pelo autor Leal Junior (2010), estão representados na Tabela 4-8.

Tabela 4-8 – Emissões de NOx, SOx, CO e MP por modo de transporte

	Emissão de NOx g/1000.t.km	Emissão de MP g/1000.t.km	Emissão de SOx g/1000.t.km	Emissão de CO g/1000.t.km	Emissão total de poluentes g/1000.t.km
Hidroviário	1,508	0,065	0,075	0,031	1,679
Ferroviário	2,734	0,068	0,135	0,022	2,959
Rodoviário	8,260	0,578	0,558	0,038	9,433

Fonte: Leal Junior (2010)

4.2.2.1.4 *Consumo de pneus*

Além do combustível, o pneu é outra importante matéria-prima do sistema logístico e, como corresponsável, o contratador de serviços de transporte carrega consigo a responsabilidade pelo seu correto encaminhamento, fazendo uso da logística reversa para um descarte adequado, evitando a queima ou disposição em aterros, em conformidade com a Política Nacional Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). Esse parâmetro ambiental afeta principalmente o sistema de transporte rodoviário, já que os outros modos somente adotam essa contabilização quando o trecho final envolve o sistema rodoviário.

O Guia Pneus (2019) indica que a durabilidade de um pneu de caminhão varia entre 60.000 e 80.000 km. Para este estudo, considerou-se uma durabilidade de 75.000 km e uma quantidade de 34 pneus por caminhão, tipo Rodotrem, com capacidade de 50 t de carga.

Em termos de grandeza, a fim de mensurar a magnitude desse impacto, para o transporte de 12,0 Mt de coproduto por ano, o consumo anual de pneus de um sistema de transporte puramente rodoviário seria de, aproximadamente, 350.000 unidades. Com um sistema multimodal otimizado, resultando em uma matriz com fluxos divididos entre 14% ferroviário, 56% aquaviário e 30 % rodoviário, esse número passaria para cerca de 86.000 unidades, ou seja, mais de 260.000 pneus deixariam de ser consumidos e, ainda mais, deixariam de ser encaminhados para um destino apropriado pós-consumo (reciclagem ou recapagem).

Dessa maneira, o consumo de pneus assume grande importância e deve ser monitorado e controlado, ainda mais levando em consideração a alta escalabilidade para o transporte do produto e da complexidade ecológica envolvida no tratamento dos resíduos gerados por esse tipo de transporte, no caso, um pneu inservível. Ademais, é preciso ponderar que seu consumo está relacionado a outro resíduo gerado – o detrito.

4.2.2.1.5 *Detritos de pneus (carbono negro ou negro de fuligem)*

O pneu é uma importante matéria-prima para a efetivação do transporte, mesmo nos modos de transporte ferroviário e aquaviário, pois, por vezes, é preciso uma perna rodoviária para completar as entregas. O desgaste provocado no pneu decorre do atrito entre a borracha vulcanizada e os diversos tipos de estradas por onde o veículo trafega. Ao longo desse percurso são gerados resíduos de materiais compostos e particulados, cujos componentes impactam diretamente no meio ambiente, contaminando o ar e, quando transportados pela chuva,

contaminam o solo, lençóis freáticos e reservatórios de água próximos das vias (LEAL JUNIOR, 2010). Indiretamente, esse impacto pode chegar nas comunidades, causando doenças e contaminando o meio ambiente.

Os detritos de pneus podem parecer insignificantes, mas em razão das proporções de alta escala do projeto, foram devidamente considerados. No caso de transporte realizado exclusivamente por meio do sistema rodoviário, 12,0 M t transportados resultariam na geração de cerca de 1 Mt de detritos por ano no entorno das estradas. A configuração de um sistema logístico multimodal otimizado resulta em uma economia aproximada de 750 tons de detritos de pneus por ano, que seriam gerados e dispostos no meio ambiente ao longo das rodovias.

Os detritos discriminados na Tabela 4-9 são compostos químicos que causam impactos negativos na sociedade, como o enxofre, que pode se associar a outros compostos e ocasionar chuvas ácidas, ou o próprio carbono negro, também conhecido como negro de fumo, que já foi apontado pela OMS por seu impacto deletério geral sobre a saúde. Segundo Lequy et al. (2021), a presença desse poluente na atmosfera está associada a um aumento de 30% no risco de câncer de pulmão.

O carbono negro é um composto orgânico nanoparticulado resultante da influência humana, formado por sulfato, cinzas, material orgânico, poeira, nitrato e aerossóis naturais. Segundo Bond et al. (2013), o carbono negro em suspensão na atmosfera é o segundo agente que mais contribui para o aquecimento global. Essa característica decorre principalmente de suas propriedades, que permitem a absorção de radiação solar e remissão dessa energia para as moléculas de ar da atmosfera em forma de radiação térmica infravermelha. Em conjunto com o efeito albedo, estes são os principais causadores do efeito estufa e aquecimento global.

Tabela 4-9 – Composição do material de banda de rodagem do pneu

Elemento / composto	%
Carbono (negro de fumo)	70,0
Hidrogênio	7,0
Óxido de Zinco	1,2
Enxofre	1,3
Ferro	15,0
Outros	5,5

Fonte: Mulha et al. (2006)

Tais moléculas do ar têm um tempo de vida maior e são facilmente transportadas em larga escala para longas distâncias, cruzando fronteiras e causando impactos negativos em nível global. Jacobson (2004) pesquisou a correlação do carbono negro com o derretimento de neves e geleiras; além de alterações no clima, há indícios de contaminação direta do solo e água, com

diminuição da produtividade agrícola. Estima-se que cerca de 1 kg de carbono negro aquece a atmosfera 500 a 680 vezes mais do que 1 kg de CO_2 , ao longo de 10 anos, e mais de 1.500 vezes em um período de 20 anos.

Kopp et al. (2009) relatam que o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) estimou que a força radioativa do carbono negro é mais de 1 milhão de vezes maior que a do CO_2 . Os autores ressaltam a importância de monitorar e controlar a emissão do carbono negro, além dos GEEs. No estado de São Paulo, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2014) estabelece diretrizes para regulamentar a lei instituída de Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC, 2009), indicando parâmetros para medição e controle da emissão de carbonos negros.

Mulha et al. (2006) estimam que cerca de 3,5 kg de material de banda de rodagem do pneu são consumidos em até 300.000 km, que é igual à quantidade de detritos gerada. No caso em estudo, para um veículo de carga tipo Rodotrem de 34 pneus, para cada km percorrido, foram gerados 0,4 g de materiais compostos e particulados contaminantes, dos quais 0,3 g/km (70%) são de carbono negro.

Isto posto, esse parâmetro de geração de detritos de pneu (carbono negro) por km por tonelada útil transportada também foi considerado na modelagem multiobjetivo.

4.2.2.1.6 Vazamentos (óleo e lubrificantes)

Assim como os detritos de pneus são poluentes e prejudiciais, os vazamentos de óleo e lubrificantes também podem se acumular e contaminar rios, lagos lençóis freáticos e oceanos, interferindo no ecossistema aquático, além de contaminar solos, plantações e animais (LEAL JUNIOR, 2010).

A Constituição Federal e a Política Nacional do Meio Ambiente, instituída pela Lei nº 6.983 (BRASIL, 1981), estabelecem diretrizes de controle do lançamento de poluentes no meio ambiente, proibindo seu lançamento em níveis perigosos e nocivos para a sociedade e meio ambiente. De acordo com a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP, 2007), os limites máximos de lançamentos de óleo são de 50 mg/l de água, assim, pode-se dizer que um litro de óleo pode contaminar até 20.000 l de água (CONAMA, 2005).

A *National Waterways Foundation* (2012) converteu a litros e quilômetros a quantidade de óleo perdida por vazamento por tipo de transporte, conforme se observa na Figura 4-26. Para

se ter uma ideia da escalabilidade desse impacto, segundo parâmetros norte-americanos e com base em uma frota bem mais conservada do que a brasileira, para escoar 12 Mt por ano, um sistema de transporte puramente rodoviário chegaria a vaziar quase 580.000 l de óleo, potencial para contaminar mais de 12 trilhões de litros de água. Ao considerar um sistema logístico multimodal otimizado, esse valor de vazamento diminuiria para 320.000 litros de óleo, deixando de contaminar mais de 5 trilhões de litros de água.

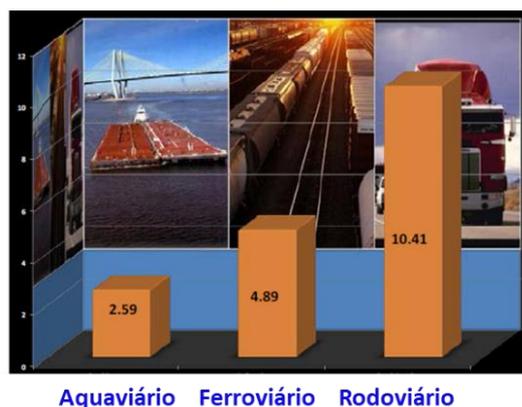


Figura 4-26 – Vazamento de óleo entre modais (galões vazados por milhão de tons-milhas)
 Fonte: *National Waterways Foundation* (2012)

4.2.2.2 Impactos ambientais positivos – benéficos

Diante do exposto nos capítulos anteriores, a substituição das matérias-primas das cadeias de construção civil pelos resíduos minerais ultrafinos proporciona diferentes impactos ambientais, de acordo com o produto a ser substituído. No caso do clínquer, este substitui o calcário e a argila; no caso da cerâmica vermelha, a própria argila e, no caso do segmento de concreto, substitui o clínquer. Dessa forma, a extração dessas matérias-primas, fontes de recursos minerais não renováveis, é evitada, bem como o seu beneficiamento e transporte até os destinos.

Em conformidade com os parâmetros ambientais estabelecidos nas premissas do Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC, 2022a; 2022b; 2022c) e considerando a base metodológica desenvolvida pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, em colaboração com o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS), desenvolveu-se uma ferramenta de gestão ambiental pautada pela Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), só que mais simples de ser implementada.

Essa parceria resultou na aplicação do projeto-piloto ACV Modular no setor de blocos de concreto (JOHN et al., 2014). A simplificação teve como princípio facilitar sua aplicação

com baixos custos, a partir da coleta de dados primários junto ao setor da construção, de modo a permitir a identificação de pontos de melhoria no sistema, analisando e reduzindo ao máximo o uso de dados secundários. O objetivo foi possibilitar, de forma prática e simples, a incorporação do método no processo de tomada de decisão das empresas na ACV simplificada das cadeias produtivas da construção civil.

Os quatro parâmetros quantitativos que foram objeto do estudo, considerados básicos e de simples levantamento, são o consumo de recursos materiais, a geração de coprodutos, as emissões de CO_2 e o consumo de energia. Esses critérios foram estabelecidos para cada produto em desenvolvimento neste projeto (clínquer, cimento, cerâmica vermelha e concreto) e comparados com produtos de referência atualmente disponíveis no mercado. A Figura 4-27 ilustra uma fronteira do sistema geral, que posteriormente será detalhada para cada produto analisado.

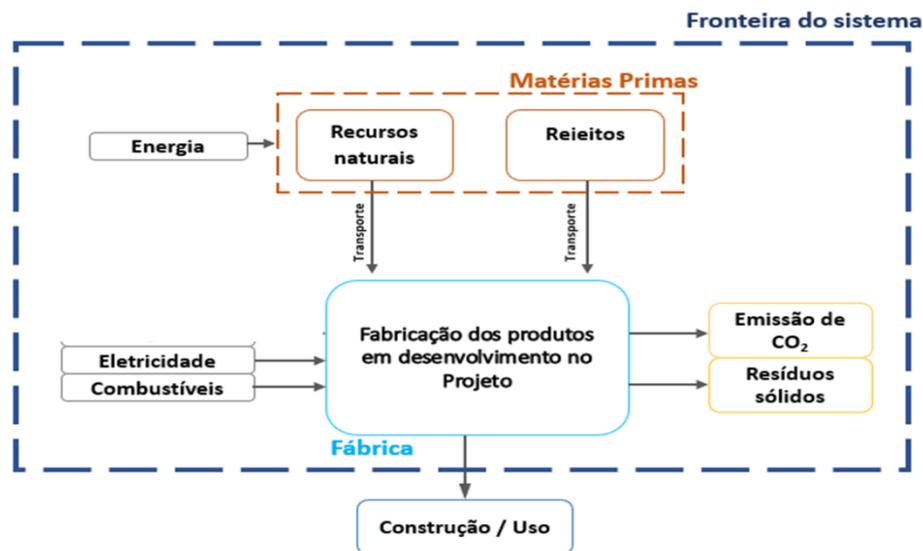


Figura 4-27 – Delimitação genérica da fronteira dos sistemas a serem estudados, referentes aos produtos em desenvolvimento no projeto

Fonte: Adaptado de SIDAC (2022)

4.2.2.2.1 Economia de recursos naturais

O indicador de consumo de recursos calcula a quantidade de recursos materiais necessários para a produção de um produto, conforme pode ser visto na equação a seguir. Ele considera todos os recursos naturais e reciclados utilizados no processo produtivo, com exceção da água e dos recursos energéticos, e deve contabilizar as perdas incorporadas. No entanto, para simplificação, tais perdas não serão consideradas neste processo.

$$Rec = \frac{\sum_i Rec_i}{UF}$$

Onde:

Rec: consumo de recursos naturais e/ou reciclados (kg/UF);

Rec_i: consumo do recurso natural/reciclado i (kg);

UF: unidade funcional.

4.2.2.2.2 *Consumo de coproduto*

O indicador de geração de coprodutos é a quantidade de coproduto gerado para produzir o produto, conforme equação apresentada a seguir. Esse indicador não inclui a perda incorporada (material consumido sem necessidade).

$$Res = \frac{\sum_i Res_i}{UF}$$

Onde:

Res: consumo de coprodutos (em t/UF);

Res_i: quantidade do coproduto i consumido (em t);

UF: unidade funcional.

4.2.2.2.3 *Economia de emissões de CO₂*

Conforme já tratado na subseção 4.2.2.1.2, o dióxido de carbono (CO₂) é a principal causa do aquecimento global, pois corresponde a 76% das emissões de GEEs. O setor da construção tem grande participação nessas emissões, principalmente do CO₂, devido ao consumo de combustíveis fósseis como fonte energética para a fabricação de materiais de construção (BRASIL, 2022).

Usualmente, a pegada de carbono é avaliada convertendo todos os gases de efeito estufa em quilogramas de CO₂ equivalente, considerando o potencial de aquecimento global de cada gás. No entanto, como o CO₂ é o principal gás de efeito estufa, nesta metodologia simplificada, o indicador de emissão de CO₂ avalia apenas esse gás.

4.2.2.2.4 Economia de energia

O consumo de energia analisa a energia extraída da natureza consumida no sistema de produto (energia primária), que inclui consumo de combustíveis primários, tanto fósseis quanto renováveis, assim como energia solar, eólica, hidráulica, geotérmica e nuclear.

4.2.2.2.5 Parâmetros ambientais positivos considerados

Com base em informações provenientes do SIDAC (2022a; 2022b; 2022c; 2022d), a Tabela 4-10 foi elaborada a partir da realização das devidas conversões, com a finalidade de obter os respectivos cálculos dos parâmetros ambientais benéficos por mesorregião, relacionados à substituição do coproduto em cada canal.

Tabela 4-10 – Parâmetros ambientais positivos

PARÂMETROS AMBIENTAIS POSITIVOS											
1- Consumo de Rec. Nat. (t MP/ t de coproduto)			2- Geração de Coprodutos (t)			3- Emissões de CO2 (tCo2/t coproduto)			4- Consumo de Energia Elétrica (kwh/t)		
CLQ	CER	CONC	CLQ	CER	CONC	CLQ	CER	CONC	CLQ	CER	CONC
0,12	0,24	0,01	0,12	0,24	0,01	0,05	0,18	0,01	2,8	7,5	1,5

Fonte: Adaptado de SIDAC (2022a; 2022b; 2022c; 2022d)

4.2.2.3 Impactos sociais negativos (prejudiciais)

4.2.2.3.1 Perdas

As características físico-químicas do coproduto, que é um composto mineral de partículas solúveis de sílica, argila e minerais ferrosos ultrafinos, não o classificam como um produto perigoso ao meio ambiente.

Apesar do fato de que a perda pode ser compreendida como um custo inerente ao processo logístico (um fator econômico), este modelo a considera um fator social devido às externalidades causadas ao longo da cadeia de transportes na sociedade. De acordo com Verbete (2013), as perdas têm um impacto maior sobre a sociedade, causando doenças alérgicas e respiratórias, além da forte coloração vermelha, que provoca sujidades por onde passa.

Juliá (2010) cita que as perdas relacionadas à logística de granéis minerais, no caso do minério de ferro, podem ser de quatro tipos:

- a) **desprendimento de poeira:** a poeira desprendida ao longo dos entornos dos corredores logísticos é, primeiramente, um impacto econômico decorrente da perda de massa arrastada pelo vento nos processos logísticos de armazenagem, transporte e movimentação (carga e descarga), mas também um impacto socioambiental, causando transtornos no conforto, bem-estar e saúde das comunidades e do meio ambiente nas proximidades dos corredores logísticos utilizados;
- b) **segregação granulométrica:** no caso do minério, devido à diferente dimensão das partículas, que se movimentam de formas distintas, as maiores tendem a se arrastar sobre a superfície de deposição, enquanto as finas se movem por escorregamento. Em razão das homogeneizações das características físico-químicas do coproduto MUFA, a segregação não será considerada neste estudo;
- c) **compactação:** a ação da pressão do próprio peso do material potencializado com a alta umidade do produto ou do ambiente pode fazer com que as camadas inferiores se compactem;
- d) **umidade:** pelo fato de o coproduto ficar armazenado sob sol e chuva, a umidade do mineral armazenado em pilhas sofre grande variação, interferindo no volume de peso total transportado.

Portanto, de acordo com Dalmás (2008), somente alguns tipos de perda são relacionados ao modo de transporte em razão de fatores intrínsecos, por meio de um índice de perda. Parte desse índice corresponde ao modo de transporte e outra parte se refere ao número de movimentações necessárias ao longo do corredor multimodal analisado (Tabela 4-11).

Tabela 4-11 – Índice de perda por modo de transporte

Modal / Terminal	Perda no transporte (%)	Perda no transbordo (%)
Rodoviário:		
longa distância	0,75	0,25
curta distância (ponta rodoviária)	0,40	0,25
Ferroviário	0,20	0,25
Hidroviário	0,00	0,20

Fonte: Ângelo (2005), CNT (2006c) e dados da pesquisa (2007)

Fonte: Dalmás (2008)

4.2.2.3.2 Acidentes operacionais/ vítimas fatais

O setor de transportes é responsável por mais de 70.000 acidentes por ano, provocando mais de 5.000 vítimas fatais, sendo que o modo de transporte rodoviário encabeça essa estatística (EPL, 2019b).

Segundo o IPEA (2005), um dos fatores relacionados à capacidade de transporte ferroviário e ao número de acidentes é a velocidade média dos trens comerciais brasileiros, em torno de 25 km/h, enquanto nos EUA a velocidade é de, aproximadamente, 80 km/h. Essa diferença decorre principalmente de problemas nos contornos ferroviários que, quando mal planejados, fazem com que as linhas férreas passem por dentro de áreas urbanas populosas, obrigando a diminuição da velocidade dos trens; além disso, as passagens em nível são muitas e ainda com condições precárias de manutenção, aliadas ao constante risco de invasão da faixa de domínio das ferrovias.

Para minimizar os impactos relacionados aos riscos de acidente de transporte, Dalmás (2008) indica a contratação de serviços de seguro, cujo valor é estimado a partir da valorização do dano causado. Essa valorização é calculada de acordo com um levantamento feito por Leal Junior (2010), com base em informações fornecidas pelas principais agências de transporte brasileiras divididas pela movimentação, chegando a um custo por tonelada útil (tku), conforme descrito na Tabela 4-12. Esse custo teórico pode ser compreendido como um custo de seguro.

Tabela 4-12 – Custeamento dos acidentes em transportes – Seguro

Modo	Custo médio de acidentes (R\$)	Quantidade de acidentes	Custo total de acidentes (R\$)	Produção de transporte (t.km)	Custo de acidentes R\$/1000.t.km
Hidroviário	17.790,00	13 ⁽¹⁾	231.270,00	1.272.000.000,00 ⁽¹⁾	0,1818
Ferroviário	71.160,00	2.222	158.117.520,00	164.809.000.000,00	0,9594
Rodoviário	65.350,00	26.366	1.723.049.468,00	485.625.000.000,00	3,5481

Notas: (1) Dados do Estado de São Paulo.

Fonte: DNIT (2004), MRS Logística (2009), ANTAq (2009a), Pezzi Filho (2003), ANTT (2005), CNT (2005), CETESB (2009), STSP (2007).

Fonte: Leal Junior (2010)

Entretanto, tendo em vista que o pagamento do seguro não evita os acidentes e, conseqüentemente, as mortes envolvidas, o modelo multiobjetivo irá considerar um indicador que aponta a quantidade de acidentes fatais por modo de transporte ao longo do ano de 2020, ponderados a partir da consolidação dos dados mensais divulgados pela EPL (2021), conforme

Figura 4-28, divididos pela movimentação anual em bilhões de tku de cada modal, em conformidade com os dados divulgados pela CNT (2020), ilustrados pela Tabela 4-13 Tabela 4-13.



Figura 4-28 – Vítimas fatais em acidentes por tipo de transporte
Fonte: EPL (2021b)

Tabela 4-13 – Movimentação anual em bilhões de tku e Matriz de Transportes de Cargas

Matriz do Transporte de Cargas		
Modal	Bilhões (TKU)	Participação (%)
Rodoviário	1.548,0	64,86
Ferroviário	356,8	14,95
Cabotagem	249,9	10,47
Hidroviário	125,3	5,25
Dutoviário	106,1	4,45
Aéreo	0,6	0,03
Total	2.386,7	100,00

Fonte: Ministério da Infraestrutura

Fonte: CNT (2020)

Os parâmetros de vítimas fatais (por bilhões de tku movimentados) por tipo de transporte considerados na modelagem multiobjetiva foram obtidos após mencionada consolidação de dados de acidentes ao longo do ano 2020 e respectivos cálculos, tabulados na Tabela 4-14.

Tabela 4-14 – Vítimas fatais por bilhões de tku – por tipo de transporte

Tipo de Transporte	Vítimas Fatais / Bi de TKU
Rodoviário	3,302
Ferroviário	0,311
Aquaviário	0,307

4.2.2.3.3 Ruídos – impacto sonoro

De acordo com Carvalho Jr. et al. (2016) e Melo (2015), a maior dependência dos motores de combustão, além de outros fatores acústicos como aerodinâmica, vibrações das

peças e atritos dos pneus, leva o setor de transportes a ser o grande responsável pelos impactos da poluição sonora causados ao meio ambiente e à sociedade.

Essa poluição sonora gerada pelo sistema de transportes, muitas vezes, é negligenciada, mesmo atingindo níveis prejudiciais. Como não deixa resíduos clássicos, é considerada menos perigosa, no entanto, a exposição repetida a essa agressão pode causar sérios problemas de saúde em toda a sociedade e ecossistema; trata-se, portanto, de um aspecto que impacta nas esferas econômica, social e ambiental, pois atinge, além do bem-estar, a questão da insalubridade dos seres humanos (MILAN, 2007).

Os ruídos causados pelos motores à combustão nos sistemas de transporte podem ainda causar desvalorizações imobiliárias e afetar a fauna e, assim, todo o ecossistema circundante (CE DELFT, 2007).

A poluição sonora é, atualmente, considerada um dos maiores fatores impactantes da vida moderna, conforme pesquisa de Carvalho Jr. et al. (2016), e na seção de Sistemas Sustentáveis de Energia e Transporte da Agenda 21 (1992), ela é vista como um problema grave nos países em desenvolvimento, que deve ser monitorado e controlado.

Segundo a OMS (2011), os principais distúrbios relacionados a esse problema são irritação, declínio da produtividade, doenças ou agravamento de patologias respiratórias, cardiovasculares, dificuldade com comunicação, problemas de sono, zumbidos, distúrbios cognitivos e patologias psiquiátricas. A OMS considera ainda que o limiar de incômodo para ruído contínuo durante o dia esteja entre 50 e 55 dBs, e abaixo dos 40 dBs durante a noite. Conforme Comissão Europeia - CE Delft et al. (2019) e Castro (2013), essas doenças, bem como outras externalidades, podem ser quantificadas em termos monetários.

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente publicou uma resolução (CONAMA, 1998) dispondo sobre o problema da poluição sonora, que afeta um número cada vez maior de pessoas. O documento define diretrizes para a realização de medições e controle, que devem estar em conformidade com a norma de acústica estabelecida e revisada pela ABNT (2019).

A Política Ambiental do Ministério dos Transportes, de 2002, engloba os princípios instituídos pela Lei nº 10.233, de 5 de junho de 2001, que trata da reestruturação dos transportes aquaviários e terrestres (BRASIL, 2001), e considera a questão dos impactos gerados pela poluição sonora do setor de transporte de extrema importância. Mais recentemente, essa questão foi consolidada pelas diretrizes socioambientais estabelecidas pelo governo (MTPA, 2016).

Os diferentes ruídos entre os modos de transporte foram considerados em conformidade com a pesquisa de Souto et al. (2018), que mediram para o modo rodoviário um valor de 70 dBs e, para o modo ferroviário, 61dBs, com base na ABNT (2019). Segundo Dalmás (2008), o impacto da poluição sonora do modo de transporte aquaviário é desprezível em relação aos demais.

Tabela 4-15 – Ruídos emitidos – DBs por tku – por tipo de transporte

Tipo de Transporte	Ruídos (DBs/ tku)
Rodoviário	70
Ferrovário	61
Aquaviário	0

Para simplificação do modelo multiobjetivo, o valor de emissão sonora (ruído) descrito na Tabela 4-15 foi considerado por tonelada transportada a cada quilômetro (tonelada útil – tku). Logo, chega-se a um fator de emissão de ruídos por tonelada útil, que foi multiplicado pelo respectivo fluxo e distância de cada destino, que será o fator considerado nesse impacto, já que é proporcional ao número de pessoas altamente incomodadas e afetadas nas imediações dos sistemas de transporte avaliados (MELO, 2015; UIC, 2010).

Apesar de as emissões de ruídos impactarem nas esferas sociais e ambientais, o modelo proposto considerou somente na esfera social.

4.2.2.4 Impactos sociais positivos (benéficos)

4.2.2.4.1 *Novas contratações – vagas*

Eskandarpour et al. (2015) constataram em sua pesquisa sobre desenho de redes sustentáveis que a criação de vagas de emprego é o indicador social mais adotado na literatura pesquisada. Pishvae et al. (2012) destacam, além da importância de considerar esse aspecto social na *Supply Chain Network Design* (SCND), a crescente relevância da responsabilidade social no mundo corporativo.

Devido à dificuldade para mensurar tais parâmetros, os autores relatam que a *International Standard Organization* (ISO) desenvolveu um guia de padrão para considerar indicadores de responsabilidade social – a ISO 26.000 – ISO 2010. A criação de novas oportunidades de emprego se enquadra em duas áreas relacionadas nesse documento: das

práticas trabalhistas e do desenvolvimento da comunidade. Esse aspecto social de criação de empregos ainda está em consonância com os padrões estabelecidos pela *Global Reporting Initiative* (GRI, 1997).

No Brasil, a taxa de desemprego “pós-Covid” bateu seu recorde no início de 2021, atingindo o percentual de quase 15% (IBGE, 2021). Somente a área de transportes representa uma importante contribuição na geração de empregos formais no país, sendo responsável por cerca de 6% de todas as vagas geradas, de acordo com o painel de emprego no transporte (CNT, 2021b), que extrai informações do relatório do Cadastro Geral de Empregados e Desempregados (CAGED), do MTE (2021), representado na Figura 4-29.

Como essa informação do saldo e total de empregos é fornecida por modo de transporte, aliada à informação de movimentação também por modo de transporte, que dá origem à matriz de transporte de cargas, disponibilizada pela CNT (2020), chega-se a um indicador de produtividade de oportunidades de emprego geradas por tku (tonelada útil – t/km), por tipo de transporte, demonstrado na Tabela 4-16.



Figura 4-29 – Painel de Informações do CAGED
 Fonte: MTE (2021)

Tabela 4-16 – Indicador de vagas de emprego geradas a cada milhão de tkus

Modo de Transporte	Vagas de Emprego gerada a cada Milhão TKUs/ semana
Rodoviário	37
Ferroviário	15
Cabotagem	14
Hidroviário	28

Os dados de emprego referentes à movimentação foram convertidos na mesma base da frequência de entrega (semanal); os empregos criados na área de Carga e Descarga e auxiliares foram adicionados a cada modo de transporte proporcionalmente ao fluxo total de cada tipo de transporte.

4.2.2.4.2 Contribuição para o PIB

Os sistemas logísticos, além de contribuírem na geração de empregos, auxiliam na melhoria da distribuição de renda à população, proporcionando melhor qualidade de vida.

O setor de transportes de cargas nacional é de extrema relevância, sendo o Brasil um país de dimensões continentais, grande exportador de produtos minerais e agropecuários e grande consumidor de produtos acabados; tudo o que é produzido ou comprado precisa ser transportado (CNT, (2019a).

Assim, além do peso direto no PIB, cerca de 7,6%, de acordo com dados da ILOS (2018), a área de transporte também impacta outros setores da economia, viabilizando o fluxo de produtos entre mercados produtores e consumidores. Dados da Fundação Getúlio Vargas (FGV, 2020) indicam que somente o setor rodoviário pode causar um impacto de 29% na economia. Nessa modelagem considerou-se apenas o impacto direto de cada modal, conforme média no período representado pela Figura 4-30. As áreas correspondentes às atividades de armazenamento e atividades auxiliares foram redistribuídas conforme participação proporcional de cada modo de transporte sobre o total.

O valor obtido foi multiplicado pelo valor da receita bruta em serviços, de 2016 (CNT, (2019b) e, em seguida, foi dividido pela respectiva movimentação de cada sistema de transporte.

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Transporte, armazenagem e correio	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Transporte terrestre	59,0%	59,5%	59,2%	59,1%	57,6%	60,0%	59,7%	62,0%	59,0%	57,8%
Transporte ferroviário e metroviário	6,1%	6,8%	5,8%	4,9%	4,8%	4,7%	4,7%	4,5%	5,0%	5,7%
Transporte rodoviário	49,6%	49,2%	49,3%	50,1%	47,3%	49,4%	48,8%	51,8%	47,6%	45,6%
Transporte rodoviário de passageiros	22,2%	21,2%	21,2%	20,0%	19,7%	19,1%	18,6%	17,2%	18,5%	18,2%
Transporte rodoviário de cargas	27,4%	28,0%	28,1%	30,0%	27,6%	30,3%	30,3%	34,6%	29,1%	27,4%
Transporte dutoviário	3,4%	3,5%	4,0%	4,0%	5,5%	5,9%	6,1%	5,7%	6,4%	6,5%
Transporte aquaviário	3,1%	2,8%	2,9%	3,3%	2,9%	3,2%	3,5%	3,5%	4,3%	4,5%
Transporte aéreo	4,6%	4,8%	5,7%	5,8%	6,7%	5,2%	5,6%	5,3%	6,0%	5,7%
Armazenamento e atividades auxiliares ao transporte	23,2%	23,5%	23,2%	23,1%	24,4%	24,3%	24,4%	22,9%	24,0%	24,9%
Correios e outras atividades de entrega	10,0%	9,5%	9,1%	8,7%	8,4%	7,3%	6,8%	6,3%	6,6%	7,1%

Figura 4-30 – Decomposição do PIB de transporte, armazenagem e correio
Fonte: CNT (2019b)

Obtém-se, dessa forma, um valor monetário da participação de cada sistema de transporte por tku, conforme Tabela 4-17.

Tabela 4-17 – Contribuição de Renda do PIB – por tku – por sistema de transporte

Sistema Logístico	R\$ de PIB por tku	
Rodoviário	R\$	0,14
Ferroviário	R\$	0,11
Aquaviário	R\$	0,07

4.3 MODELO PROPOSTO

Dentre as alternativas estudadas no Capítulo 2, que avaliaram todo o contexto apresentado sobre o desenho de um sistema logístico sustentável, o método que melhor se aplica para a solução do problema de desenho de sistemas logísticos sustentáveis de forma otimizada é o da modelagem de otimização multiobjetivo linear, este método visa inicialmente à maximização do Lucro Total, principal fator econômico, expresso nas equações seguintes apresentadas. Ademais, consideram-se também os objetivos de minimizar os impactos socioambientais negativos e maximizar os impactos socioambientais positivos, de acordo com relevância descrita.

O principal objetivo e resultado na modelagem matemática multiobjetivo proposta é a determinação do desenho, ou seja, da configuração do fluxo ótimo ao longo de toda rede de transportes multimodal capacitada (disponível) atualmente no sistema logístico brasileiro. Esse fluxo otimizado ocorre em termos econômicos, expressos pela maximização do Lucro Total resultante da comercialização, subtraído do custo logístico que compõe todo o sistema logístico (multimodal).

Paralelamente, a otimização também acontece em termos ambientais e sociais, com o objetivo de reduzir os impactos negativos decorrentes do sistema logístico obtido e aumentar os efeitos positivos. Dessa maneira, a análise do resultado da modelagem sob diferentes óticas cria novas oportunidades para uma proposta eficientemente otimizada de sistema logístico de escoamento de minério com uma visão mais holística, expressa em termos sustentáveis (econômicos, ambientais e sociais).

Ao utilizar o método de resolução de restrições – ϵ , explorado na subseção 4.1.5.1, um dos objetivos é escolhido como único objetivo a ser otimizado, enquanto os demais são tratados

como restrições de desigualdade. Aplicam-se, então, os métodos clássicos de resolução para otimização com um objetivo de programação linear, conforme metodologia de desenho de redes proposta por Soncim (2002) e abordada por Cia e Cunha (2021).

Assim, um índice de sustentabilidade a ser otimizado foi estabelecido e, a partir desse ponto, inicialmente, determina-se a solução de desenho de redes de transportes de máximo Lucro Total para escoamento de um resíduo de origem mineral, que pode ser utilizado no mercado de construção civil, de forma a mitigar seu acúmulo em barragens de rejeito de beneficiamento do minério de ferro.

A maior parte dos problemas de otimização de desenho de sistemas logísticos na literatura têm como objetivo principal a diminuição dos custos logísticos totais, segundo Kabadurmus e Erdogan (2020). Entretanto, ao minimizar os custos logísticos, podem existir custos indiretos, como os comerciais (vendas e impostos), não considerados, criando uma possibilidade de lucros diferenciados, que poderiam não ser contemplados para tomadas de decisões. Portanto, com uma abordagem pautada por uma visão mais holística e com níveis de tomada de decisão mais estratégicos, que envolvem o desenho do sistema logístico do projeto, o objetivo da consideração do pilar econômico da sustentabilidade considerado foi o de ampliar a questão sustentável envolvida neste estudo.

Devido à substituição das respectivas matérias-primas de cada produto, a abordagem de maximização do Lucro Total considerou os preços e impactos ambientais benéficos diferenciados por tipo de produto e região, bem como os impactos causados pelo fluxo sobre o sistema logístico multimodal desenhado para efetivar esse escoamento. Para cada canal há um ganho diferenciado no impacto ambiental, em razão dos diferentes processos produtivos em cada canal a ser consumido.

Permitir-se-ia, assim, integrar níveis de decisão táticos e estratégicos, envolvendo ainda a maximização do LT, com precificação diferenciada por canal mercadológico e por região, além de considerar a maximização dos impactos socioambientais positivos e minimização dos negativos, descritos na subseção 4.2.2. Assume-se que o preço de venda de cada canal mercadológico (tipo de produto) $Pv_{(k,j)}$ tem valor proporcional ao valor de cada coproduto (k) do mercado da construção demonstrado na subseção 4.2.1, localizada em cada mesorregião (j), de acordo com estratégia de *marketing* definida pela empresa e valores de mercado.

Logo, os destinos do coproduto correspondem a 106 mesorregiões, localizadas nas regiões Sul, Sudeste, Nordeste e Centro-Oeste do país. Para cada um dos 106 destinos $j = 1, 2,$

..., 106 é conhecida a demanda $D_j > 0$ do resíduo, que foi determinada com base no potencial de cada mesorregião, considerando os três canais $k=1,2,3$ (clínquer, cerâmica vermelha e centrais dosadoras de concreto), como descrito na subseção 3.1.2.

Diante das restrições de capacidade de transporte que devem ser consideradas na otimização dos fluxos na rede, foram definidos, para fins da modelagem matemática, nove “modos de transporte combinados”, denominados genericamente pela letra m , que correspondem à utilização combinada da rodovia e de cada uma das ferrovias; estas, por sua vez, podem realizar o transporte direto até o destino ou serem combinadas com o transporte rodoviário e/ou aquaviário, de acordo com a subseção 3.1.3.

As variáveis de decisão $X_{j,k}^m$ indicam os fluxos de transporte para atender cada canal de cada coproduto k , da única origem para cada destino j , utilizando o modo de transporte combinado m , como descrito acima.

Para cada destino j , formado por uma das mesorregiões, define-se um custo de transporte C_j^m , calculado segundo as definições da subseção 3.1.3; assume-se um valor de custo de transporte C_j^m muito elevado no caso em que o destino j não pode ser atendido por um modo de transporte m . Consideram-se ainda os impactos socioambientais de cada rota formada entre origem e destinos – ISA_j^m , conforme abordado na subseção 4.2.2, que podem ser positivos ou negativos, ou seja, benéficos ou prejudiciais.

Definem-se $i = 1, 2, \dots, |I|$ infraestruturas de transporte e transbordo com restrição de capacidade; por exemplo, uma ferrovia pode ser dividida em n trechos, com capacidades distintas ou, alternativamente, um *hub* de transbordo pode ter um limitante superior de fluxo. Para cada infraestrutura $i = 1, 2, \dots, |I|$ é conhecida a sua capacidade U^i .

Define-se ainda o coeficiente $a_j^{m,i} = 1$ se o destino j , atendido pelo modo de transporte combinado m , utiliza a infraestrutura i e $a_j^{m,i} = 0$, caso contrário. Dessa forma, cada modo de transporte combinado m pode atender vários destinos j e é restrito pelas capacidades das infraestruturas (transporte e transbordo) U^i dos trechos que os compõe.

Para exemplificar a aplicação desses coeficientes, considera-se, hipoteticamente, uma ferrovia pertencente ao modo de transporte m , que pode ser dividida em três trechos consecutivos, denominados i_1, i_2 e i_3 , cujas respectivas capacidades são U^{i_1}, U^{i_2} e U^{i_3} ; ao final de cada um desses trechos, à beira da ferrovia (portanto, sem necessidade de um percurso rodoviário), localizam-se três destinos, denominados respectivamente j_1, j_2 e j_3 . Assim, atender

ao destino j_3 com o modo de transporte combinado m implica percorrer os três trechos i_1, i_2 e i_3 da ferrovia, portanto, $a_{j_3}^{m,i_1} = a_{j_3}^{m,i_2} = a_{j_3}^{m,i_3} = 1$; de modo similar, atender ao destino j_1 implica percorrer apenas o trecho i_1 , então $a_{j_1}^{m,i_1} = 1$ e $a_{j_1}^{m,i_2} = a_{j_1}^{m,i_3} = 0$, uma vez que os trechos i_2 e i_3 não são utilizados para alcançar o destino j_1 .

O balanceamento otimizado dos fluxos se dá pela relação das suas variáveis de decisão e das suas restrições, integrando, de forma sistemática e sustentavelmente otimizada, os canais de venda e os canais logísticos, permitindo tomadas de decisões em um nível estratégico muito mais amplo.

Dessa forma, esta pesquisa propõe o estabelecimento da função multiobjetivo de maximizar a sustentabilidade, que pode ser desdobrada de forma multiobjetiva na otimização de seus pilares, dados pelos Impactos Econômicos (Imp. Eco), Sociais e Ambientais (Imp. So. Amb.), que podem ser positivos ou negativos, de acordo com a equação (6).

$$Max\ Sust = Max\ Imp. Eco + Max\ Imp. Soc. Amb_{pos} + Min\ Imp. Soc. Amb_{Neg} \quad (6)$$

O Lucro Total, que também pode ser descrito pela equação (7), resulta da soma do lucro de cada coproduto k e mesorregião j , sem considerar impostos, pois trata-se da reutilização de um resíduo resultante da extração do minério de ferro e se enquadra em uma classificação especial de incentivos fiscais.

O lucro de cada coproduto k é igual à receita unitária, resultante da receita de venda decrescida do respectivo custo logístico unitário do modal indicado pelo modelo para atendimento daquela região.

$$L_{(k,j)} = R_{(k,j)} - CL_{(X,m,k,j)} \quad (7)$$

A Receita de cada produto em cada mesorregião - $R_{(k,j)}$, conseqüentemente, também será maximizada e composta pela soma das receitas de cada coproduto k , com k variando de 1 a 3. Os Custos Logísticos (CL) dependem da quantidade expressas pelo fluxo $X_{j,k}^m$ escoado por meio de modo de transporte m , além do tipo de coproduto k que definem a localização da mesorregião destino j .

Dessa forma, o Impacto Econômico (Imp. Eco,) considerado foi o Lucro Total, representado na equação (8),

$$Max\ LT = \sum_{k=1}^3 L_{(k,j)} * X_{(k)} \quad (8)$$

sujeitos a:

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{m=1}^9 X_{j,k}^m \geq D_{j,k} \quad j = 1, 2, \dots, 106 \quad (9)$$

$$\sum_{m=1}^9 \sum_{j=1}^{106} a_j^{m,i} \cdot X_j^m \leq U^i, \quad i = 1, 2, \dots, |I| \quad (10)$$

$$X_j^m \geq 0 \quad (11)$$

As funções objetivo (7) e (8) asseguram a maximização do Lucro Total. As restrições (9) impõem que a demanda total e de cada destino, formado por cada mesorregião j , seja atendida, utilizando um ou mais modos combinados de transporte m . Já as restrições (10) asseguram que a capacidade de cada infraestrutura i , que pode ser utilizada por um ou mais modos combinados m para atender aos destinos j , seja respeitada. Por fim, as restrições (11) impõem que os fluxos na rede sejam variáveis contínuas, e não podem assumir valores negativos.

Para uma abordagem multiobjetiva, após a resolução do objetivo inicial do modelo de maximização do LT, os demais objetivos de minimizar os impactos negativos e maximizar os positivos, expressos pelos parâmetros socioambientais decorrentes do sistema logístico estabelecido, devem ser reformulados em restrições de desigualdade a um fator variável, conforme o método de resolução do \mathcal{E} restrito abordado na subseção 4.1.5.

A partir das equações (1) e (2), sujeitos às equações (3), (4) e (5), é possível reescrevê-los conforme demonstrado nas próximas equações.

Objetivo 1: Maximizar Lucro Total (LT). Conforme considerações, variáveis e parâmetros definidos na seção 4.2, pode-se expressar a primeira função objetivo do modelo multiobjetivo. Os demais objetivos também podem ser formulados em função do fluxo $X_{j,k}^m$.

$$Max. LT = \sum_{k=1}^3 \sum_{m=1}^9 \sum_{j=1}^{106} (Pv_{k,j} - CLT_{k,j}^m) * X_{k,j}^m \quad (12)$$

Objetivo 2: Minimizar os Impactos Socioambientais Negativos Totais

$$Min. ISA_negT = \sum_{k=1}^3 \sum_{m=1}^9 \sum_{j=1}^{106} ISAneg_{j,k}^m * X_{j,k}^m \quad (13)$$

Objetivo 3: Maximizar Impactos Socioambientais Positivos Totais

$$Max. ISA_{pos}T = \sum_{k=1}^3 \sum_{m=1}^9 \sum_{j=1}^{106} ISA_{pos}^m_{j,k} * X^m_{j,k} \quad (14)$$

Os impactos socioambientais negativos (ISA_{Neg}) e positivos (ISA_{pos}) são definidos conforme parâmetros estabelecidos na subseção 4.2.2. Após a escolha do objetivo a ser otimizado, no caso, o de maximizar o LT, os demais objetivos são transformados em restrições de desigualdade, em conformidade com a direção da otimização, nas equações (15) e (16).

Impõe-se, dessa forma, a todo sistema logístico, uma condição socioambiental mais benéfica, porém, com uma nova direção do objetivo inicialmente otimizado.

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{m=1}^9 \sum_{j=1}^{106} ISA_{neg}^m_{j,k} * X^m_{j,k} \leq \epsilon_m, m = 1, \dots, N_{Obj} e m \neq u \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{m=1}^9 \sum_{j=1}^{106} ISA_{pos}^m_{j,k} * X^m_{j,k} \geq \epsilon_m, m = 1, \dots, N_{Obj} e m \neq u \quad (16)$$

Com a diminuição ou aumento do índice ϵ_m , é possível avaliar as variações no LT, com a redução do objetivo secundário proposto – impactos socioambientais – ISA negativos, ou com o aumento dos impactos positivos – ISA positivos.

Com base em estudo de Análise de Ciclo de Vida (ACV) simplificada do novo coproduto envolvendo as duas cadeias de mineração e de materiais da construção conectadas pelo sistema logístico desenhado, os principais impactos considerados na subseção 4.2.2 foram consolidados na Tabela 4-5, que tem como base a legislação, normas, regulamentações e artigos técnicos relacionados nesta pesquisa, que consolidam e descrevem cada impacto socioambiental considerado.

Dessa forma, a partir das equações (15) e (16), podem ser desdobradas as equações (17) a (22).

$$ISA_{pos} = IS_{pos} + IA_{pos} \quad (17)$$

$$IS_{pos} = Vagas + PIB \quad (18)$$

$$IA_{pos} = EN + CO2 + RNs + CCop \quad (19)$$

onde,

Vagas – Novas Contratações

PIB – Contribuição para o PI

EN – Economia de Energia

CO2 – Economia de Emissões de CO2

CCop – Consumo de Coproduto

RN – Economia de Recursos Naturais

Por outro lado, os impactos socioambientais – ISA negativos – prejudiciais são:

$$ISA_{Neg} = IS_{Neg} + IA_{Neg} \quad (20)$$

$$IA_{neg} = PETRO + CO2 + PA + Vaz. + Pneus + CN \quad (21)$$

$$IS_{Neg} = Res + Ruido + Acid. Fat. \quad (22)$$

Onde:

PETRO – Consumo de Combustível Fóssil

Co2 – Emissões de Co2

PA – Emissões de Poluentes Atmosféricos

Vaz. – Vazamento de óleo

Pneus – Consumo de pneus.

CN – Detritos de pneus – Carbono Negro–

Res. – Resíduos de minério

Ruido – Emissão de ruídos

Acid. Fat. – Acidentes fatais

Conforme demonstrado na seção 5.2 o € restrito definido para esse estudo foi o parâmetro de consumo de combustíveis fósseis (PETRO). Com uma variação contante de €, em direção ao objetivo proposto, com a finalidade de diminuir os impactos socioambientais, obtêm-se diferentes valores para cada impacto considerado. Porém, como os impactos mensurados por parâmetros são de diferentes magnitudes, para serem agrupados em seus respectivos objetivos, precisam ser previamente normalizados. O valor obtido de cada parâmetro estabelecido de cada impacto foi dividido pelo seu “melhor valor” entre a faixa resultante dos valores obtidos com a variação de €, de acordo com o objetivo de cada pilar (positivo ou negativo) (AZUMA, 2011; FROTA NETO et al., 2008).

De acordo com valores sustentáveis estabelecidos, realiza-se um agrupamento com pesos iguais entre si nos respectivos pilares da sustentabilidade (econômico, ambiental ou

social), que serão ponderados segundo os cenários estabelecidos. Conforme sugerido pelos autores na seção 5.3, com os valores obtidos, é possível analisar de forma gráfica o comportamento dos resultados dos objetivos entre si, em consonância com as respectivas variações de \mathcal{E} -restrito.

A superfície “sustentável” obtida avalia a questão da sustentabilidade, formada pela conjunção das soluções ótimas entre os seus pilares (econômico, social e ambiental). Demonstram-se, nesse formato, as fronteiras de Pareto, uma conjugação de valores nos quais um objetivo não pode ser melhorado sem prejudicar o outro.

Cria-se ainda melhores condições analíticas para uma avaliação de custo x benefício (*tradeoff*) entre os parâmetros e correspondentes variações dos pilares da sustentabilidade entre si relacionados.

4.4 CENÁRIOS DE PESOS DIFERENCIADOS ENTRE OS PILARES DA SUSTENTABILIDADE

De acordo com a equação (2), é possível variar o peso de cada função objetivo do modelo multimodal proposto, onde $w_n \in [0,1]$ é o peso de cada função objetivo f_n ($n=1,\dots,N_{Obj}$).

A função sustentabilidade considerada neste estudo pode ser expressa, a partir da equação (2), como a maximização do lucro total e dos impactos e socioambientais positivos juntamente com a minimização dos impactos socioambientais negativos, demonstrados na equação (23).

$$\text{Sustentabilidade: } w_1 * \text{Max Econ.}_{pos} + w_2 * \text{Min ISA}_{neg} + w_3 * \text{Max ISA}_{pos} \quad (23)$$

onde: $w_n \in [0,1]$.

Dessa forma, conforme Tabela 4-18, foram desenvolvidos quatro cenários para avaliar os diferentes efeitos no resultado obtido pelo desenho de sistemas logísticos sustentáveis e respectivos impactos socioambientais, pela variação dos pesos entre os Impactos Econômicos, Sociais e Ambientais.

Os parâmetros w_n foram definidos com o propósito de simular algumas possíveis variações desses pesos relacionados à importância de cada pilar. Para melhor compreender suas relações e comportamento, o primeiro cenário possui o mesmo peso de importância entre os três objetivos da sustentabilidade, enquanto o segundo tem maior peso no objetivo econômico;

o terceiro cenário conta com maior peso de importância no ambiental e o quarto, maior peso no objetivo social.

Tabela 4-18 – Pesos (w_n) de importância de cada pilar da sustentabilidade

	Impactos Econômicos	Impactos Ambientais	Impactos Sociais
Cenário 1	33,3%	33,3%	33,3%
Cenário 2	60,0%	20,0%	20,0%
Cenário 3	20,0%	60,0%	20,0%
Cenário 4	20,0%	20,0%	60,0%

5 RESULTADOS

A primeira seção desse capítulo apresenta os primeiros resultados da otimização inicial que considera atendimento de 100 % da demanda em potencial estimadas na subseção 4.2.1. No entanto, para o alcance integral dessa demanda, o sistema logístico desenhado teria custo logístico maior que a receita, conferindo assim prejuízo para o produto em questão tornando sua comercialização inviável.

Assim, em consonância com a metodologia proposta no capítulo 4 realiza-se uma seleção das mesorregiões mais lucrativas de acordo com estratégia da empresa, visando o lucro total do sistema positivo. O custo logístico elevado decorre principalmente da falta de capacidade de transporte do sistema logístico multimodal, isto é, dos gargalos do transporte ferroviário, que foram demonstrados na subseção 5.1.2.

Ao considerar um menor atendimento da demanda, a partir da seleção das mesorregiões mais lucrativas o coproduto torna-se viável economicamente. A segunda parte da resolução do problema foca na aplicação do método de solução do ϵ -restrito para a modelagem multiobjetivo, com a reformulação de um dos parâmetros em uma restrição de desigualdade à um valor ϵ variado, de forma a demonstrar graficamente o comportamento dos outros valores obtidos em função da nova variação imposta, como resultado os valores ótimos são expressos pela superfície de Pareto.

Na seção 5.3 os cenários propostos na seção 4.4 são avaliados; na sequência, a seção 5.4 é responsável por aplicar uma análise detalhada de *trade off* sobre o primeiro cenário. Finalmente no capítulo posterior, os resultados dessa pesquisa são comentados e concluídos.

5.1 RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO INICIAL

O modelo matemático (7)-(23) apresentado anteriormente na seção 4.3, ao qual foi aplicada a metodologia de desenho otimizado do sistema logístico multimodal capacitado, descrita no capítulo 4, com objetivo principal de maximização do LT, é composto por cerca de 3.000 variáveis de decisão, que resultam na configuração multimodal ideal do fluxo de coprodutos da origem Brucutu (MG) para cada mesorregião, foi implementado e resolvido em ambiente de planilha eletrônica Excel.

Uma vez que o modelo desenhado supera o limite de variáveis do *Solver*, que vem com Excel, utilizou-se um plugin o *Opensolver* (2023), que é módulo de otimização do programa Excel, por sua maior capacidade matemática.

O modelo permite determinar o LT que corresponde à solução ótima para o sistema desenhado para atendimento da demanda, para atendimento da demanda total de 12 M toneladas ao ano. Esse lucro, obtido pela soma dos lucros de todas as regiões mapeado na Figura 5-1, foi previamente ponderado de acordo com a demanda de cada canal, em cada cidade, conforme descrito no capítulo 4.

Nota-se, nas proximidades da origem dos resíduos da usina de Brucutu, um lucro relativamente mais alto, proporcional não somente à distância, mas que também se altera conforme as características geográficas entre origem e respectivos destinos e consequentes instalações dos sistemas logísticos que os conectam e aos preços de venda diferenciados por canal e mesorregião.

Para a demanda total de 12 M toneladas ao ano, ao analisar a Figura 5-2, indicada pelos resultados do modelo dos fluxos otimizados que determinam o melhor modo de transporte, é possível perceber que para as mesorregiões localizadas a menores distâncias, o transporte rodoviário é o mais indicado na maioria dos casos, dependendo das capacidades e custos do sistema ferroviário. Esse fato também foi observado nas pesquisas de transporte de granéis agrícolas por Péra e Caixeta Filho (2022).

Por outro lado, para maiores distâncias, quando há capacidade suficiente, os sistemas multimodais (ferroviário e o aquaviário) passam a ser os mais indicados – menor custo logístico, ou seja, maior lucratividade. As numerações das mesorregiões do mapa estão em conformidade com o apresentado anteriormente na Figura 4-13.

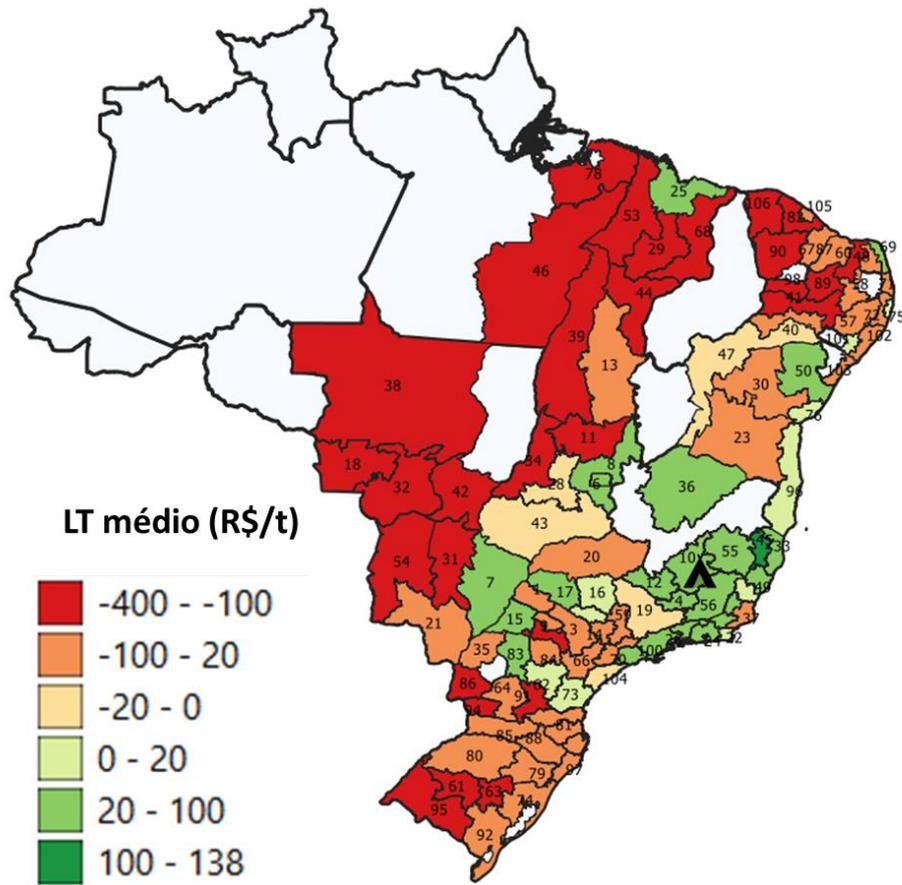


Figura 5-1 – Lucro Total (médio entre os três canais) (R\$/t)

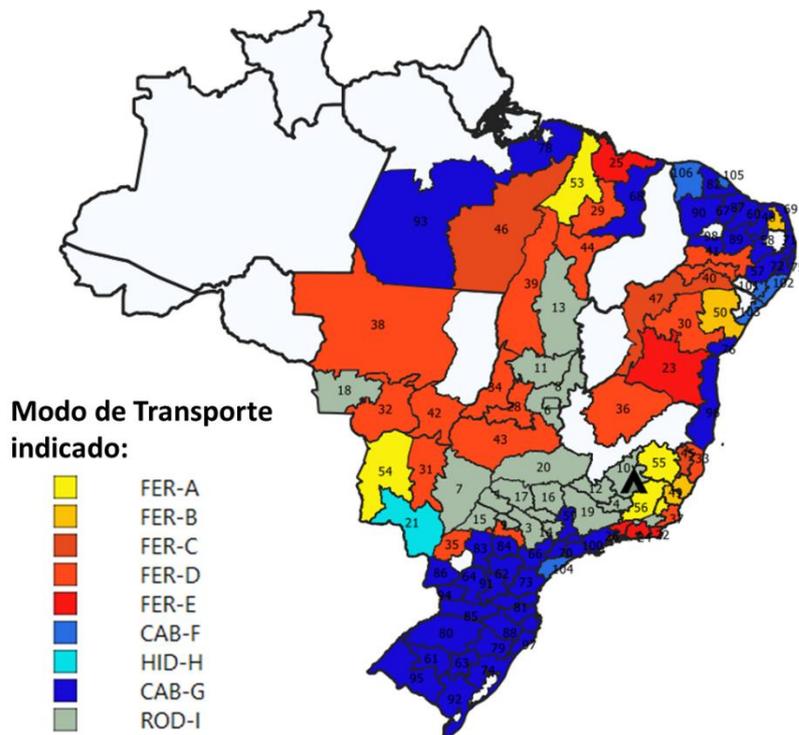


Figura 5-2 – Desenho da rede de transportes do Sistema Logístico obtido por mesoregião

É importante ressaltar que a capacidade do sistema ferroviário afeta a utilização dos diferentes modos de transporte. Por exemplo, por sua maior distância, a mesorregião do Centro Fluminense poderia ser indicada pelo resultado da execução do modelo como sistema ferroviário, mas devido às restrições de capacidade, a mesma foi sinalizada para o sistema rodoviário; as mesorregiões de Campinas e Piracicaba também poderiam ser atendidas pelo modo ferroviário, obtendo, inclusive, menor custo logístico, mas ambas não contam com capacidade suficiente. Logo, nota-se que o sistema logístico ferroviário possui com capacidade limitada, acarretando gargalos para todo o sistema, que induzem a um aumento no Custo Logístico Total em razão da necessidade do modo rodoviário, que além de ser mais custoso, provoca maiores impactos ambientais.

O resultado inicial do desenho do sistema logístico proposto pelo modelo do LT obtido para o escoamento e comercialização de 12 M tons/ano por meio do sistema logístico gerou um prejuízo de R\$ 59,00 por tonelada, conforme mostrado na Figura 5-3. Diversos resultados do comportamento do CLT, RT e LT (por t.) foram plotados de acordo com a demanda atendida; o eixo vertical da esquerda o LT, RT e CLT está expresso em R\$/t e, no eixo localizado à direita, encontra-se o número de mesorregiões abrangidas pelo sistema.

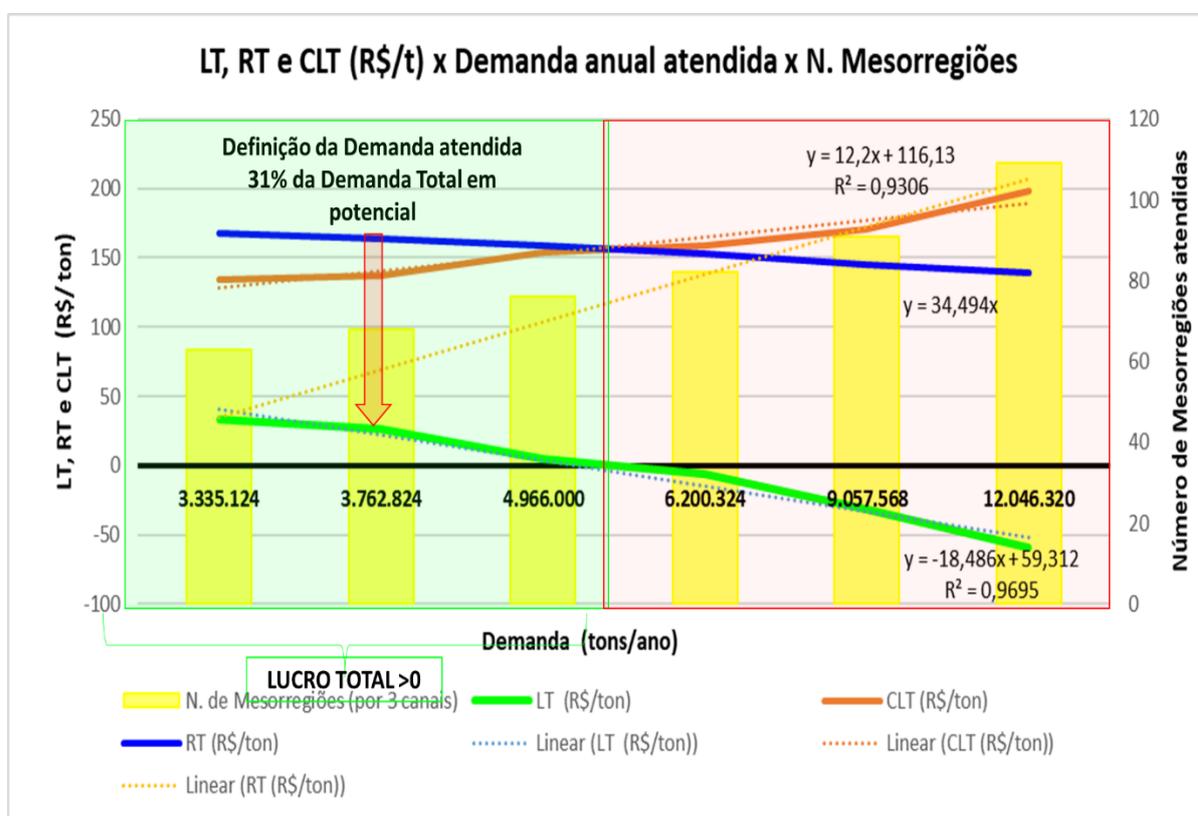


Figura 5-3 – Comportamento dos CLT, RT e LT por demanda atendida

A Figura 5-3 também revela que o CLT, a RT correspondente e o consequente LT variam de forma linear de acordo com a demanda, ou seja, varia continuamente segundo o fluxo estabelecido para atendimento da demanda de cada mesorregião. A RT (R\$/ton) varia inversamente com o atendimento da demanda, ou seja, ela diminui com o aumento desse atendimento. Dessa forma, percebe-se na figura uma região esverdeada à esquerda, na qual as RTs são maiores que os CLTs (R\$/ton), tornando o LT positivo, enquanto a região à direita, avermelhada, indica valor de LT negativo.

Com o objetivo de obter um Lucro Total de valor positivo e viabilizar economicamente o produto, em conformidade com o planejamento estratégico adotado pela empresa, a consideração de atendimento da demanda foi feita de forma parcial, primeiramente, por não ser economicamente viável nesse dimensionamento de atendimento de 100 % demanda estimada e depois, pela dificuldade de atingir todo o mercado em potencial de uma vez.

5.1.1 Seleção das mesorregiões mais lucrativas

Sob essa perspectiva restritiva para viabilização econômica do coproduto, a demanda de 12 M t/ano inicialmente estimada na seção 4.2.1 para suprir os três canais do mercado de materiais de construção, obedeceu a uma estratégia da empresa de priorizar as mesorregiões mais lucrativas. Assim, realizou-se uma seleção de acordo com as maiores faixas de valor da lucratividade de cada mesorregião.

Tendo em vista uma maior abrangência de mercado e a possibilidade de utilizar uma quantidade maior de resíduos, algumas regiões da Figura 5-1 com LT negativo (em tons suaves alaranjados) também passaram a integrar a seleção, pois foram devidamente compensadas pelas regiões com lucros positivos (tons esverdeados).

Sobre essas considerações, essa seleção visual das mesorregiões totalizou cerca de 3,8 M t/ano para atendimento da demanda (Figura 5-3), o que equivale a 31% do total da demanda estimada inicialmente, abrangendo 68 mesorregiões entre os três canais, trazendo como resultado um LT de todo o sistema logístico, obtido de quase 1,9 milhões reais semanais, ou seja, de 26 reais por tonelada. Dessa forma, entre 106 mesorregiões inicialmente mapeadas, apenas 68 foram selecionadas, de acordo com as faixas de lucro total, sendo que 20 mesorregiões visam atender ao canal mercadológico do clínquer, 21 voltam-se para cerâmica vermelha e 66 mesorregiões, para as empresas que produzem concreto (concreteiras).

O modelo foi novamente otimizado com base nas novas restrições de atendimento da demanda de 3,8 M t/ano distribuídas em 68 mesorregiões a serem atendidas, pelo sistema logístico. Com esse reprocessamento do modelo, respeitando as diversas capacidades restritivas de cada corredor logístico entre origem e destinos, além da nova restrição de atendimento de demanda, obtém-se um novo fluxo otimizado juntamente com um novo Lucro Total máximo de todo o sistema logístico de escoamento de coproduto, cerca de R\$ 1,9 milhões de reais por semana. É possível, ainda, determinar a solução ótima em termos de configurações de fluxos logísticos multimodais (Figura 5-4) e respectivos lucros/custos logísticos para cada mesorregião.

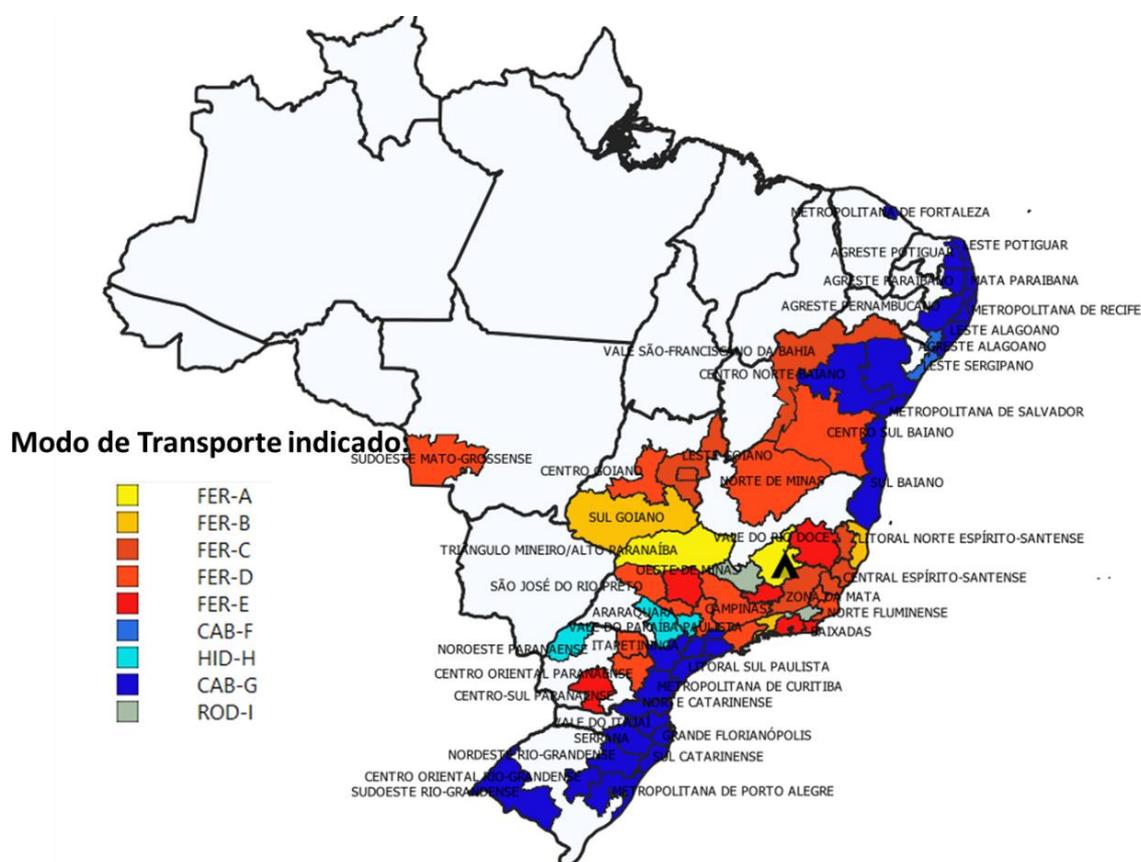


Figura 5-4 – Resultado dos modais por mesorregião após a seleção e nova otimização

5.1.2 Análise dos gargalos logísticos

Os fluxos resultantes obtidos através da utilização do modelo para cada uma das 68 mesorregiões selecionadas descritas na subseção 5.1.1, de cada opção multimodal considerada, de acordo com os tipos de *hub*, conforme descrito nas subseções 4.2.1.1 a 4.2.1.4, foram representados de forma percentual em relação ao fluxo total, como a % de utilização do sistema logístico proposto, por modo de transporte e por tipo de *hub* e consolidados na Tabela 5-1.

Tabela 5-1 – Matriz de utilização do sistema logístico multimodal resultante do modelo – com e sem restrições de capacidade

	UTILIZAÇÃO DO SISTEMA LOGÍSTICO POR TIPO DE HUB									UTILIZAÇÃO DO SISTEMA LOGÍSTICO MULTIMODAL		
	FER -A	FER -B	FER -C	FER -D	FER -E	CAB -F	CAB -G	HID -H	ROD -I	FER	AQUA	RODO
Com Restrição de Cap. Transp. Ferro	1%	2%	4%	19%	14%	3%	30%	0%	27%	40%	32%	27%
Sem Restrição de Cap. Transp. Ferro	1%	2%	4%	19%	31%	3%	20%	0%	14%	57%	23%	14%

Dessa forma a primeira linha da Tabela 5-1 indica nas colunas o percentual do total do fluxo consolidado de cada alternativa multimodal capacitado considerada para atender todas as 68 mesorregiões consideradas após seleção conforme faixas de lucro. Na primeira linha da mesma tabela, as cinco colunas *FER-A* a *FER E* são relacionadas ao transporte por ferrovias possibilitam a avaliação das diferentes opções de *hubs* (próprio, terceiro, preparado ou não para o minério ou de cimenteira), conforme abordado anteriormente na subseção 4.2.1, que variam ainda de CLT de acordo com a localização.

As configurações de *hubs* próprios (*A* e *B*) foram escolhidas apenas para alguns destinos, ou 3% do fluxo total, enquanto os terceiros (*C* e *D*), preparados ou não para movimentar o minério, apesar de terem um custo de movimentação mais elevado, são em maior número e têm sua localização descentralizada, fato este que os tornam mais “atrativos” para o modelo em 23% dos fluxos destinados às respectivas mesorregiões. Os *hubs* de cimenteiras (opção *E*), por sua vez, além de terem um menor custo de movimentação, também estão mais bem localizados, mais próximos das fábricas e, muitas vezes, não fazem uso da última perna rodoviária, já que o *hub* está dentro das fábricas de clínquer. Essa configuração foi escolhida após processamento do modelo em 14% dos fluxos destinados em cada rota formada pelo sistema logístico.

Nota-se, ainda na primeira linha das colunas da utilização do sistema logístico multimodal, que o transporte ferroviário e aquaviário, juntos, totalizam mais de 70% de todo o fluxo do sistema resultante, indicando o modo de transporte mais apropriados para o transporte desse tipo de produto, para as localizações das mesorregiões atendidas, com as considerações realizadas no modelo adotado.

Na segunda linha da Tabela 5-1 está a matriz obtida para um sistema logístico “ideal”, sem restrições de capacidade de transporte. Em comparação com a primeira linha, nota-se, nas colunas à direita, maior participação do sistema ferroviário, com a diminuição dos modos rodoviário e aquaviário, tornando o produto mais competitivo, com uma redução do CLT médio

de 137 reais por tonelada para 132 R\$/t, e consequente aumento do LT médio em R\$ 5/ton, como pode ser observado na Tabela 5-2.

O CLT semanal minimizado correspondente ao desenho de todo o sistema logístico capacitado é de R\$ 10 M, mas cairia para R\$ 9,6 M caso não houvesse restrições de capacidade nas ferrovias. Esse valor reduzido de R\$ 0,4 M, cerca de 4 % do CLT (capacitado), pode ser entendido como um sobrecusto por falta de infraestrutura suficiente, podendo ser utilizado para negociar mais cotas de transporte para esse tipo de produto ou ainda para estudos futuros de viabilidade de investimentos de aumento de capacidades das linhas de trem, visando essa redução do CLT médio do produto. É possível dizer, portanto, que o sistema está restrito por essas capacidades de transporte férreas.

Tabela 5-2 – Resultados totais do modelo objetivo – com e sem restrições de capacidade

	CLT(R\$/ sem)			LT (R\$/sem) = RT - CLT		Lmédio R\$/ton
	CLT (R\$) / sem	CLT (R\$/ton)	CLT (R\$) / sem	CLT (R\$/ton)	LT TOTAL (R\$)	
Com Restrição de Cap. Transp. Ferro	R\$ 9.943.198	R\$ 137	R\$ 1.873.827	R\$ 26		
Sem Restrição de Cap. Transp. Ferro	R\$ 9.538.690	R\$ 132	R\$ 2.278.335	R\$ 31		
Diferença (Sem rest- com))	-R\$ 404.508	-R\$ 6	R\$ 404.508	R\$ 6		

Além dessa oportunidade de redução de custo com aumento das capacidades no transporte ferroviário pode-se avaliar também os impactos socioambientais negativos e positivos (prejudiciais e benéficos) correspondentes na Tabela 5-3. Sem as restrições do transporte ferroviário haveria redução no consumo de combustível, pneus e emissões de CO₂, PA, detritos de pneus, vazamento de óleo, vítimas fatais e perdas, contudo, também seriam observados aumentos relativos à contribuição do PIB e aos impactos sonoros e a diminuição das vagas criadas.

Tabela 5-3 – Impactos socioambientais – com e sem restrições de capacidade

	PARÂMETROS AMBIENTAIS NEGATIVOS						PARÂMETROS SOCIAIS POSITIVOS		PARÂMETROS SOCIAIS NEGATIVOS		
	Emissões TOTAIS (t CO2/sem)	Consumo Comb. (l/sem)	Detritos de pneu (kg)	Pneus cons. (#/sem.)	Emissões PA (g/sem)	Vazam.de óleo Diesel (l/sem)	Vagas Criadas	PIB	Impactos sonoros	Vit. Fatais por ano	Perdas (t/sem)
Com Restrição de Cap. Transp. Ferro	1623	715	868	200	237	914	1180	R\$ 6.872.759	4.509	2,33	375
Sem Restrição de Cap. Transp. Ferro	1310	598	637	146	223	803	1120	R\$ 6.909.874	4.712	1,96	336
Diferença (Sem rest- com))	-313	-117	-231	-54	-14	-111	-60	R\$ 37.115	203	-0,37	-39

Com base na análise mais detalhada dos resultados da execução do modelo, o principal gargalo identificado no sistema logístico ferroviário para a demanda considerada foi o atendimento das mesorregiões pertencentes aos estados de São Paulo, da região Sul e parte do Rio de Janeiro, mais especificamente, o trecho da MRS na Ferrovia do Aço, entre os *hubs* de Bom Jardim (FOJ) e Pitangueiras (FIR).

No que se refere ao transporte de cabotagem, na primeira linha da Tabela 5-2, que considera o sistema real, com capacidades entre os *hubs* portuários, os próprios, em menor número e mais concentrados, foram escolhidos 3% dos casos; os terceiros estão localizados de forma descentralizada em 30% dos casos. O transporte aquaviário (fluvial), com menos de 1% dos fluxos, não é um sistema de transporte muito indicado pelo modelo para as condições ora estudadas, e mesmo na configuração “sem restrições de capacidade do transporte ferroviário”, tal opção não é a mais apropriada.

5.2 RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO - ANÁLISE DO ε -RESTRITO

Dando continuidade à proposta deste trabalho, de aplicar uma metodologia de otimização multiobjetivo para o desenho de sistema logísticos sustentável, já descrita nas subseções 2.1.5 e 4.1.5.1, realizou-se, inicialmente, uma otimização para minimizar o LT total do sistema, a fim de obter o ponto que servirá de referência para o LT máximo. Em seguida, um dos parâmetros do objetivo de minimizar o impacto socioambiental negativo (prejudiciais) foi transformado em restrição de desigualdade no modelo de otimização e dessa forma resolvido pelo *plugin* do Excel (*Opensolver* 2023).

Após uma série de análises envolvendo todos os parâmetros considerados, demonstrada a seguir, o parâmetro que melhor aderiu à metodologia de ser transformado em uma desigualdade restritiva foi o de consumo de combustíveis, principalmente por ser comum a todos os meios de transporte considerados no modelo, ou seja, um parâmetro “chave”, já que se relaciona com grande parte dos demais parâmetros.

Não foi possível resolver o modelo pelos algoritmos disponíveis pelo *plugin* do Excel (*OpenSolver*), provavelmente, devido às relações que os demais parâmetros têm entre si e sua possível não linearidade no que se refere à nova restrição imposta ao modelo, quando alguns foram reformulados como restrição.

Para efeitos comparativos envolvendo diferentes estratégias e tipos decisões, o modelo foi adaptado para outra demanda, em conformidade com o estudo multimodal com otimização multiobjetivo de Pinheiro (2012), que minimiza/maximiza diferentes objetivos. Esse trabalho narra diversas tentativas de minimizar os parâmetros socioambientais negativos e maximizar os sociais com impacto positivo (benéficos), transformando o LT em restrição de desigualdade. Os resultados detalhados obtidos pelas técnicas do ε -Restrito, variando os objetivos primários, de acordo os parâmetros considerados, foram consolidados no Apêndice G.

Preliminarmente, nota-se que alguns parâmetros, como o consumo de pneus e emissão de ruídos, não possibilitaram uma solução pelo *Opensolver*, o que pode ser explicado, talvez, pela sua não linearidade em relação aos demais padrões e aos objetivos (Figura 5-5). Em seguida, quase todos os parâmetros têm comportamento diferente do resultado obtidos com a aplicação do método do ϵ -restrito; percebem-se, assim, diferentes tipos de influência de cada parâmetro sobre o resultado, mas todos alcançam a mesma fronteira ótima de Pareto, mesmo que por caminhos distintos.

Ademais, na matriz obtida, é possível observar um resultado bem diferente quando o PIB é maximizado; o sistema rodoviário contribui grandemente para esse fato, já que os parâmetros variam em função do tipo de transporte, distâncias e fluxos. Somente os parâmetros de vagas criadas e acidentes tiveram um comportamento semelhante na aplicação do ϵ -restrito, pois, nesse caso, exercem o mesmo tipo e força de influência sobre o resultado.

As respectivas participações do fluxo de cada tipo de transporte indicado pelo modelo conforme a variação do ϵ restrito foram expressas em porcentagem com relação ao fluxo total e demonstrados na Tabela 5-3.

Tabela 5-4 – Matriz logística da metodologia do ϵ -restrito de consumo de combustíveis

UTILIZAÇÃO DO SISTEMA LOGÍSTICO POR TIPO DE HUB									UTILIZAÇÃO DO SISTEMA LOGÍSTICO MULTIMODAL			
FER -A	FER -B	FER -C	FER -D	FER -E	CAB -F	CAB -G	HID -H	ROD -I	FER	AQUA	RODO	$\epsilon \leq$
1%	2%	4%	19%	14%	3%	30%	0%	27%	40%	32%	27%	715
1%	2%	4%	19%	14%	3%	30%	0%	27%	41%	32%	27%	710
1%	1%	5%	19%	14%	3%	30%	0%	27%	41%	32%	27%	705
0%	0%	6%	19%	15%	1%	28%	2%	26%	41%	32%	26%	700
2%	0%	6%	19%	15%	3%	30%	0%	25%	42%	32%	25%	695
3%	0%	6%	19%	15%	3%	30%	0%	24%	43%	32%	24%	690
4%	0%	6%	19%	15%	3%	30%	0%	23%	44%	32%	23%	685
5%	0%	6%	19%	15%	3%	30%	0%	22%	45%	32%	22%	680
6%	0%	6%	19%	15%	3%	30%	0%	21%	46%	32%	21%	675
7%	0%	6%	19%	15%	3%	30%	0%	20%	47%	32%	20%	670
8%	0%	6%	19%	15%	3%	30%	0%	19%	48%	32%	19%	665
9%	0%	6%	19%	15%	3%	30%	0%	18%	49%	32%	18%	660
9%	0%	6%	19%	15%	2%	30%	0%	17%	50%	32%	17%	655
9%	0%	6%	19%	15%	2%	30%	0%	17%	50%	32%	17%	650
9%	0%	6%	19%	15%	1%	31%	0%	17%	50%	33%	17%	645
9%	0%	6%	21%	14%	1%	31%	0%	17%	50%	33%	17%	640
9%	0%	6%	21%	13%	1%	31%	0%	17%	50%	33%	17%	635
9%	1%	6%	20%	14%	1%	31%	0%	17%	50%	33%	17%	630
9%	3%	6%	18%	14%	1%	31%	0%	17%	50%	33%	17%	625
10%	3%	7%	17%	13%	1%	31%	0%	17%	50%	33%	17%	621

Observa-se que a variação do ϵ -restrito (consumo de combustível) induz uma mudança na matriz do sistema logístico. Quanto maior é a imposição da restrição de desigualdade do consumo de combustível, ou seja, menor ϵ , menor é a participação do modo puramente rodoviário, com aumento da participação do modo ferroviário e maior participação dos *hubs* ferroviários próprios adaptados para o minério (opção *A*). Entre o sistema aquaviário de cabotagem, houve um ligeiro aumento na participação da opção *G*, que contempla *hubs* portuários de terceiros, com localização mais descentralizada; assim, o sistema aquaviário fluvial aumentou. Essas mudanças na utilização do sistema logístico multimodal acarretam ainda alterações nos parâmetros socioambientais estabelecidos de cada modo de transporte, conforme mostrado na Figura 5-5.

Conforme sugestão de Azuma (2011), as diferenças entre os valores de ϵ foram mantidas com diferenças uniformes para possibilitar uma melhor interpretação de como o LT pode oscilar em função da variação dos ϵ estabelecidos para a desigualdade restritiva de consumo de combustível adotada e, conseqüentemente, variação dos respectivos parâmetros socioambientais. Dessa maneira, o índice ϵ variou de modo a induzir o direcionamento da função objetivo a uma direção oposta ao seu objetivo (i.e, de maximizar o lucro) e avaliar o impacto nos demais parâmetros socioambientais positivos e negativos estabelecidos.

Os resultados obtidos para os diversos parâmetros estabelecidos, em conformidade com a variação de ϵ consolidados nos gráficos da Figura 5-5 ainda foram tabelados no Apêndice *H*. Pela análise das figuras resultantes dessa aplicação da metodologia do ϵ -restrito, ao imputar-se menores valores para o parâmetro ϵ de consumo de combustíveis, com a resolução do modelo, notam-se diferentes comportamentos nos parâmetros estabelecidos. Alguns diretamente ou inversamente proporcionais, lineares, outras não.

Essas diferenças no comportamento dos parâmetros estabelecidos existem pelos diferentes efeitos das diversas conjugações do sistema logístico multimodal formado por diferentes configurações dos modos de transporte e tipos de *hub* e respectivas distâncias que os conectam, resultantes da solução do modelo multiobjetivo, em razão da variação imposta da restrição ϵ .

O limite de execução da solução do modelo foi de, aproximadamente, 621 kl/sem, ou seja, para valores de ϵ abaixo desse valor não foi possível, com as ferramentas utilizadas, encontrar uma solução real factível que satisfaça a otimização objetivo respeitando todas as restrições impostas ao modelo.



Figura 5-5 – Variação dos parâmetros com a variação do ε-restrito – consumo de combustíveis

No pilar ambiental positivo que considera os impactos benéficos na cadeia de materiais de construção, conforme descrito anteriormente na subseção 4.2.2.2, resultantes das substituições de coproduto nas matérias-primas para quantidade anual de atendimento da demanda, de aproximadamente 3,8 M t/ano ou 73.602 kt semanais foram consolidados na Tabela 5-5.

Tabela 5-5 – Resultados dos parâmetros ambientais positivos

RESULTADOS DOS PARÂMETROS AMBIENTAIS POSITIVOS															
Consumo de Rec. Nat. (t/sem)				Geração de Coprodutos (t/sem)				Economia de Emissões de CO ₂ (tCo ₂ /sem)				Consumo de Energia Elétrica (Mwh/sem)			
CLQ	CER	CONC	TOTAL	CLQ	CER	CONC	TOTAL	CLQ	CER	CONC	TOTAL	CLQ	CER	CONC	TOTAL
4.679	3.552	248	8.478	4.679	3.552	158	8.388	2.156	2.603	165	4.924	113	111	27	252

Observa-se um grande ganho ambiental decorrente da economia de recursos naturais, da geração aproximada de 8,5 kt/sem de coprodutos, de menores emissões de CO₂, aproximadamente 5.000 toneladas semanais, e da redução da energia elétrica de 252 de Mwh. Mesmo descontando o total de CO₂ emitido por todo sistema logístico, cerca de 1,6 kt, tem-se uma economia de mais de 3,4 kt semanais de CO₂.

Esses benefícios não ocorrem diretamente na cadeia de minério, mas devido a viabilização comercial desse coproduto essa substituição é possível e está estreitamente ligada à cadeia da construção civil, mais especificamente pelos processos de extração de matérias-primas (argila e calcário) e pelos processos produtivos, como na redução do uso dos fornos de clínquer, que atingem altíssimas temperaturas, e na carbonatação do calcário, que emite consideráveis quantidades de CO₂. Esse ganho ambiental compartilhado agrega valor ambiental ao coproduto, que pode buscar melhores condições comerciais de negociação e ganhar viabilidade econômica em todo o mercado.

5.3 ANÁLISE DE CENÁRIOS APLICADA A ESTRATÉGIAS EMPRESARIAIS OU POLÍTICAS PÚBLICAS

A fim de fomentar alternativas de investimentos tanto públicos quanto privados em infraestrutura de transportes do sistema logístico multimodal de uma forma sustentável, de acordo com a importância de cada pilar estabelecido, pode-se comparar os diferentes comportamentos na curva da função da sustentabilidade obtida para o desenho de sistemas

logísticos multimodais, conforme os cenários propostos com diferentes pesos relativos à importância entre os pilares econômicos, ambientais e sociais.

O material apresentado no Apêndice H e na seção 5.4 permite uma análise de *trade off* entre as variações do ϵ -restrito e variações correspondentes, nos parâmetros dos pilares da sustentabilidade estabelecidos, contudo, para uma avaliação mais ampla, entre os pilares, é fundamental que haja uma normalização dos parâmetros considerados a fim de agrupá-los nos respectivos pilares da sustentabilidade de acordo com o tipo de impacto causado. Os resultados de cada impacto (benéficos ou prejudiciais; positivos ou negativos) apresentam diferentes magnitudes e objetivos; então, para serem devidamente comparados em uma mesma base, foram normalizados conforme descrito anteriormente na seção 4.3.

Para tanto, o valor obtido de cada parâmetro e de cada impacto foi dividido pelo melhor valor entre os valores obtidos, com as variações do ϵ -restrito, de acordo com o objetivo de cada pilar. Dessa forma os impactos benéficos foram divididos pelo maior valor e os prejudiciais pelo menor. Em seguida, foram agrupados aos seus respectivos pilares, sem diferenciação de importância entre cada parâmetro (AZUMA, 2011; FROTA NETO et al., 2008). Conseqüentemente, a evolução desses pilares com a variação do ϵ -restrito é apresentada na Figura 5-6.

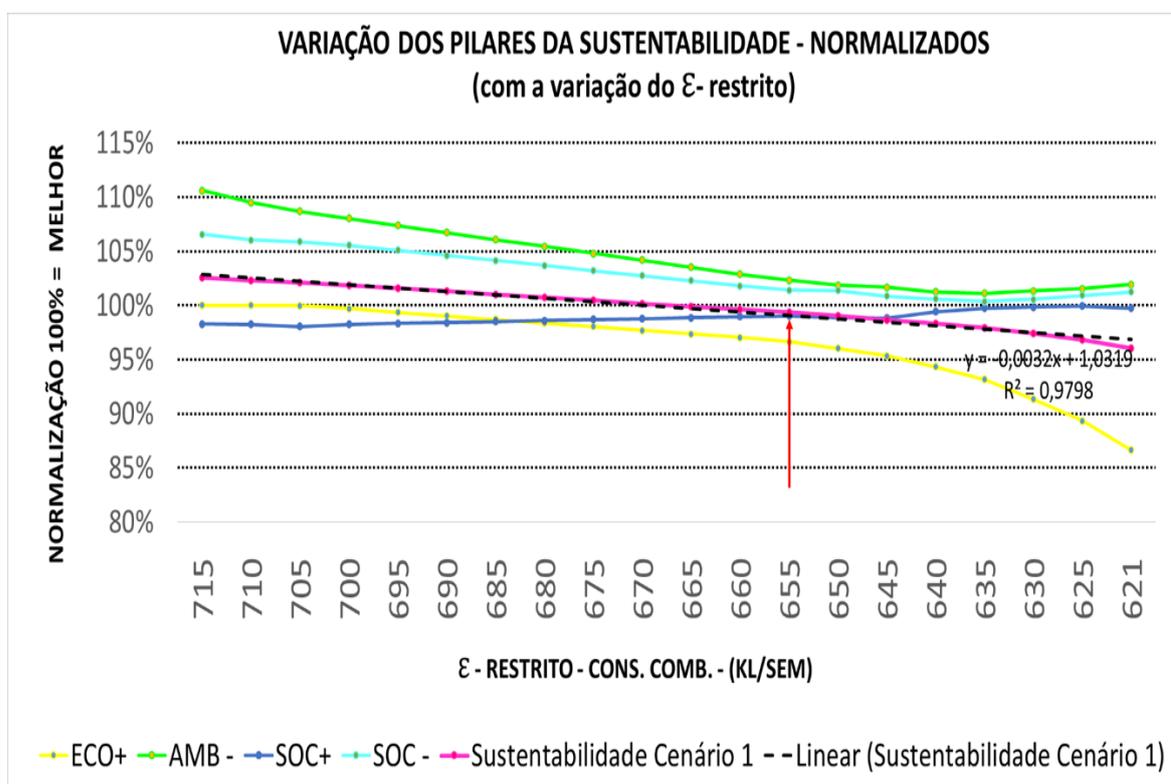


Figura 5-6 – Variação dos pilares da sustentabilidade de acordo com ϵ

Ao analisar as curvas do gráfico da Figura 5-6, percebe-se o efeito da variação do pilar econômico em relação aos demais. O ponto $\varepsilon=715$ (kl/sem), mais à esquerda, é o ponto inicial, que corresponde a não haver restrição do ε aplicado. Um dos objetivos expressos pelo parâmetro de consumo de combustível foi transformado em restrição de desigualdade e aplicou-se um novo valor de $\varepsilon=710$ (kl/sem), e assim sequencialmente, com intervalos iguais, conforme sugestão de Azuma (2011), as diferenças entre os valores de ε foram mantidas com diferenças uniformes para possibilitar uma melhor interpretação até o limite mínimo de solução do modelo 621 (kl/sem), abaixo desse valor não é possível estabelecer soluções reais positivas de fluxos.

Como mostrado na Tabela 5-1, Figura 5-5 e Figura 5-6 da seção anterior com a imposição de novas condições de ε ao modelo, dada pela inclusão da restrição de desigualdade, resulta-se novos fluxos otimizados, novas configurações do sistema logístico, além de decorrentes variações dos parâmetros considerados nos pilares da sustentabilidade.

Em seguida, os diferentes cenários estabelecidos na seção 4.4 de acordo com diferentes pesos que relacionam a importância de cada pilar é possível avaliar os diferentes comportamentos da curva da função sustentabilidade descrita na equação (23). O primeiro cenário estabelece pesos iguais, a segundo maior importância ao pilar econômico, o terceiro prioriza o ambiental e o quarto o social. Assim, esses pesos podem ser modificados para análise de diferentes resultados (Figura 5-7), segundo a estratégia empresarial ou governamental de priorização entre os pilares sustentáveis para determinação da melhor configuração da rede de escoamento logística e possíveis investimentos de infraestrutura nos gargalos logísticos.

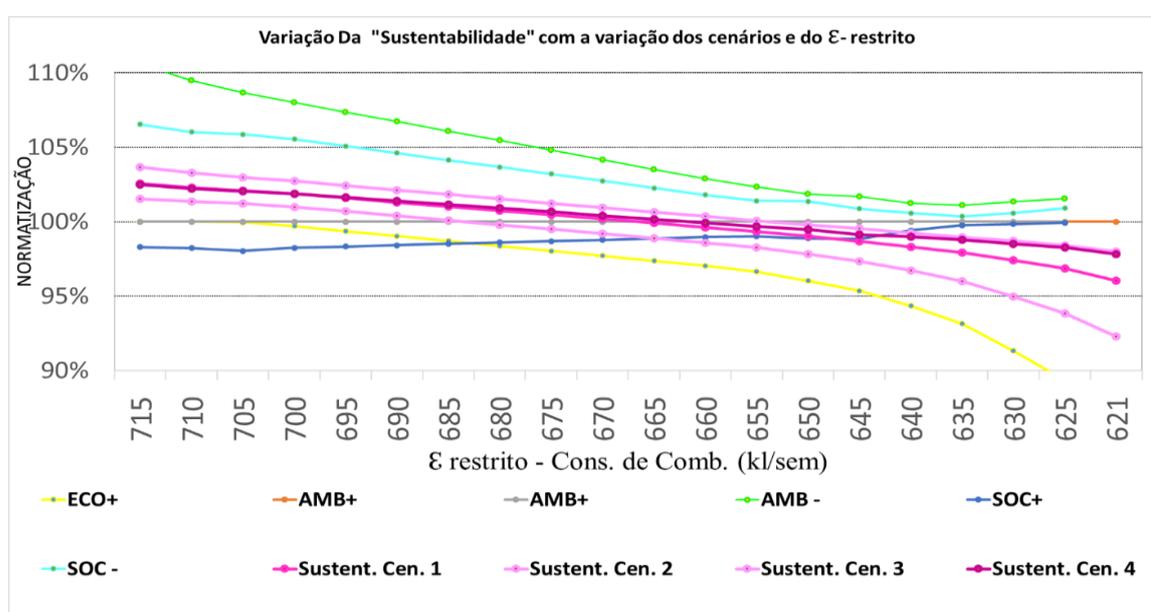


Figura 5-7 – Curvas do comportamento da sustentabilidade de acordo com os cenários de diferentes pesos dos respectivos pilares

Conforme

Tabela 4-18 e Figura 5-7, o cenário 1, que considera pesos iguais nos três pilares, apresenta um comportamento mais equilibrado, mais próximo da região ótima de 100% (considerada na normalização) enquanto nos demais cenários a curva da sustentabilidade se assemelha e se aproxima do comportamento da curva do pilar de predominância, sendo que o cenário 2 revela maior proximidade ao pilar econômico, o cenário 3, ao ambiental, e o quarto cenário reflete maior importância aos impactos sociais.

Conforme a maior exigência da condição restritiva de desigualdade, ou seja, um menor valor de ϵ , mais o pilar econômico se distancia do seu ponto ótimo (100%) de forma quase linear até o ponto $\epsilon=655$, depois adquire uma forma exponencial, distanciando-se do ponto ótimo. Essa diminuição exponencial do pilar econômico, representado pelo Lucro Total - LT justifica-se pelo aumento exponencial do Custo Logístico Total (CLT) uma vez que a Receita Total é constante e independe do valor de ϵ . Esse aumento decorre do novo sistema logístico proposto para o atendimento da restrição ϵ , com CLT cada vez maior.

Os pilares representados pelos impactos socioambientais negativos melhoram, se aproximando de 100%, já que, na normalização o valor de 100% foi considerado o menor valor para os impactos negativos (prejudiciais) e o maior para os impactos positivos benéficos. Em seguida, os impactos ambientais pioram novamente e os impactos sociais positivos só melhoram. Esse comportamento se dá principalmente devido ao semelhante comportamento da curva dos parâmetros estabelecidos, na Figura 5-5 - emissão de CO₂, emissão de PA, consumo de pneus e detritos de pneus).

Os impactos ambientais positivos, dados pela substituição do coproduto pelas matérias primas de construção civil, assim como a Receita Total, são decorrentes somente do efeito da comercialização do coproduto e assim da restrição de atendimento da demanda, não dependendo dessa forma diretamente da configuração do sistema logístico resultante, permanecendo estáveis em 100% com a variação de ϵ .

5.4 ANÁLISE DE *TRADE OFF* – CUSTO-BENEFÍCIO APLICADA AO CENÁRIO 1

Essa seção aprofunda a análise referente ao primeiro cenário analisado na seção anterior, detalhado também na

Tabela 4-18 da seção 4.4, que considera a exemplo de Frota Neto et al. (2008) os respectivos pesos w iguais entre os parâmetros estabelecidos e respectivos pilares, aplicada a equação (23) para a conjugação dos pilares econômicos, sociais e ambientais, com o propósito de constituir a sustentabilidade. Dessa forma, chega-se à equação roxa da Figura 5-6, que assume um comportamento quase linear em função da variação do parâmetro, de acordo com o R^2 obtido.

Na Figura 5-8 observa-se, com a imposição da restrição de desigualdade do valor de ϵ realizada que não é possível melhorar um objetivo sem o detrimento dos outros, com exceção do objetivo ambiental com efeitos positivos, que como detalhado no final da seção anterior não dependem do sistema logístico desenhado resultante da resolução do modelo.

Logo, percebe-se um decréscimo no eixo horizontal, formado pelo pilar econômico, de aproximadamente 5%. Nesse ponto nota-se uma convergência dos demais pilares para uma região próxima do 100%, ou seja, com o decréscimo de 3% nos Lucros Totais, o pilar ambiental negativo melhora quase 7%, o social negativo, 5%, e o social positivo, aproximadamente 1%.

Para o ponto assinalado na Figura 5-8 foi desenvolvido um diagrama de Stankey, (2023) na Figura 5-9, representando o fluxo de produtos pelos modos de transporte do sistema logístico que atendem aos respectivos estados agrupados de acordo com suas regiões. Há estados mais próximos da origem com a utilização dos modos ferroviário e rodoviário, enquanto os mais distantes são atendidos pelos modais ferroviário e aquaviário.

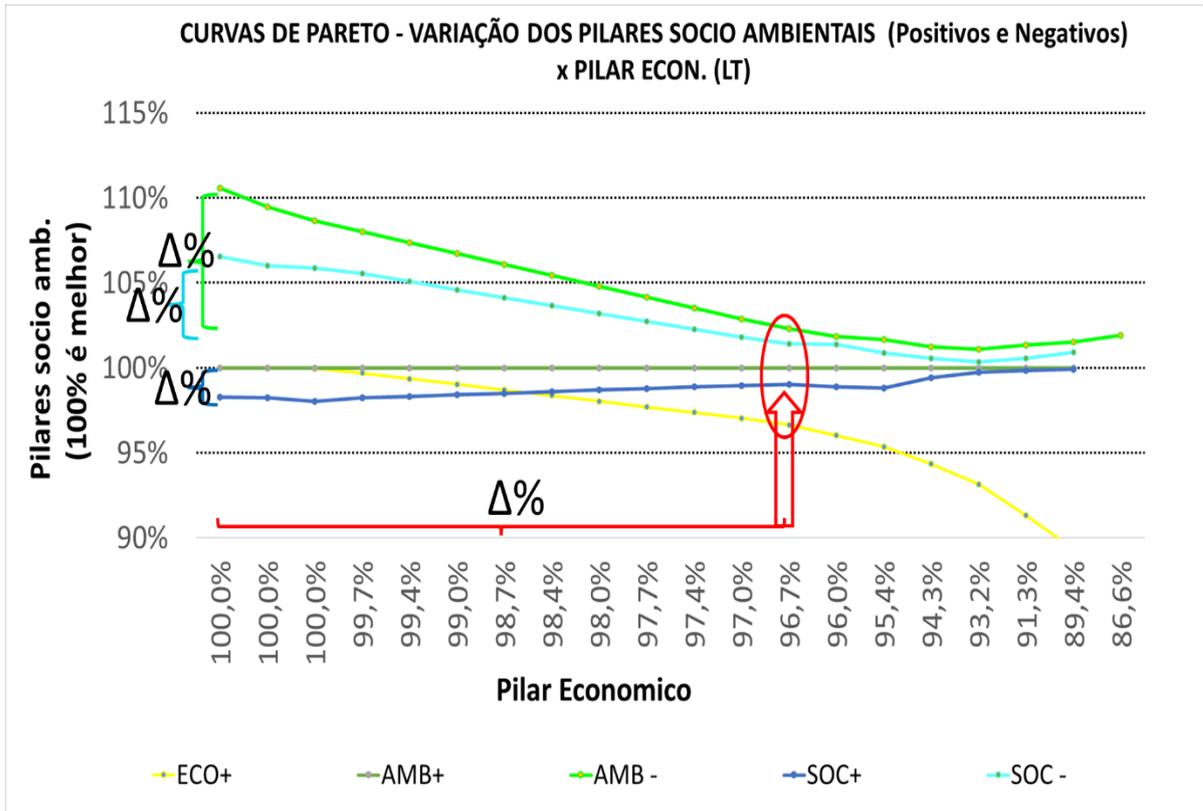


Figura 5-8 – Curvas de Pareto – variação dos pilares socioambientais em função do pilar econômico

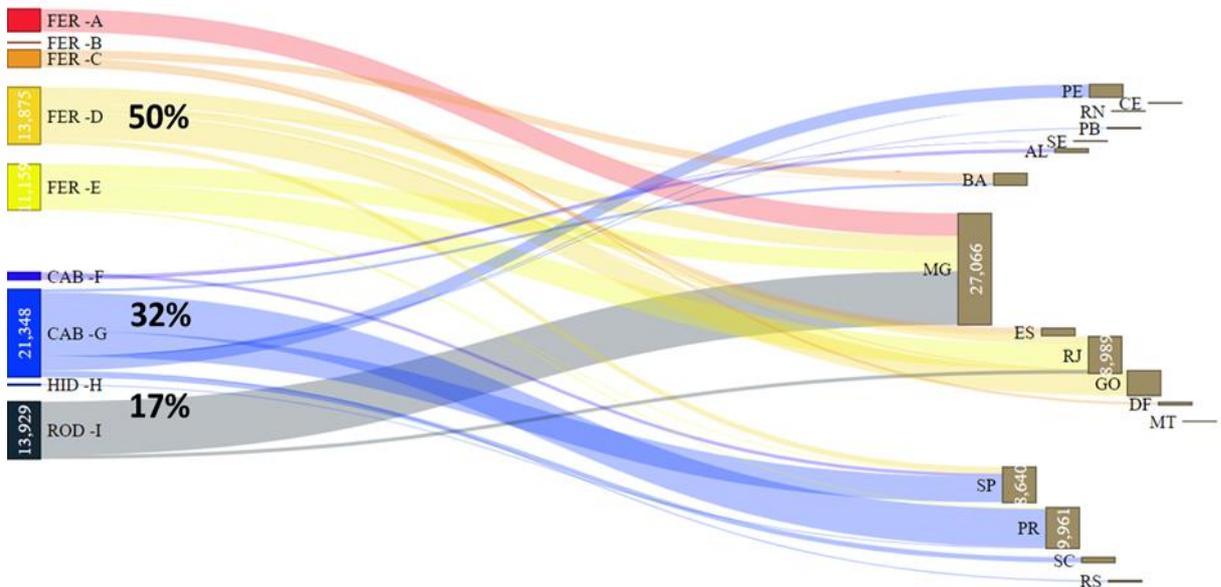


Figura 5-9 – Fluxos entre os modos de transporte do sistema logístico e estados – ponto sustentável

Assim, é possível comparar os Lucros (R\$/t) e respectivas alternativas de transporte do sistema logístico para cada mesorregião considerada na Tabela 5-6 entre o ponto inicial otimizado, sem restrição de desigualdade ϵ e o ponto sustentável, com restrição ($\epsilon=655$ kl/sem) que foi indicado pela seta vermelha na curva da sustentabilidade da Figura 5-6, aonde a mesma mais se aproxima do valor de 100% ponto considerado ideal na normalização realizada.

A diferença de 3% do pilar econômico, cerca de R\$ 1,00 por tonelada a menos do Lucro Total, pode ser notada na última linha da Tabela 5-6, resultante da diferença entre quatro mesorregiões grifadas na mesma tabela compreendidas pelas mesorregiões de Central e Sul Espírito-Santense, a metropolitana de Belo Horizonte e a Zona da Mata. Para o atendimento dessas mesorregiões, os fluxos logísticos tiveram o tipo de utilização de seus modos de transporte e tipos de *hubs* alterados no sistema com a imposição da restrição ϵ de desigualdade, que impõe um menor consumo de combustível.

Basicamente, as mudanças ocorreram na utilização do modo rodoviário para o ferroviário, que tem um consumo menor de combustível, satisfazendo a restrição ϵ , porém implica num custo logístico relativamente maior.

Outra mudança indicada pelo modelo foi nos tipos de *hubs* utilizados, de próprios para *hubs* terceirizados, que são mais descentralizados. Conforme mostrado na , o aumento de CLT e conseqüente redução do LT induz a uma melhora para os outros objetivos da sustentabilidade; o pilar ambiental negativo melhora quase 7%, o social negativo, 5% e o social positivo melhora aproximadamente 1%. Essa diferença nos pilares é ocasionada pelas diferenças de cada parâmetro considerado que os compõe.

Tabela 5-6 – Comparação entre o ponto inicial ótimo (sem restrição ϵ) e com restrição ($\epsilon=655$ kl/sem)

MESOREGIÃO	ESTADO	FLUXO TOTAL (t/sem)	PONTO INICIAL ÓTIMO		PONTO SUSTENTÁVEL ÓTIMO					
			ALTERNATIVA ÓTIMA	LT (R\$/10t)	ALTERNATIVA ÓTIMA	LT (R\$/ton)				
LESTE ALAGOANO	AL	899	CAB-F	-40	-19	CAB-F	-40	-19		
AGRESTE ALAGOANO			CAB-F	-11		CAB-F	-11			
SUL BAIANO			CAB-G	-13		CAB-G	-13			
CENTRO SUL BAIANO	BA	2940	FER-E	52		FER-E	52			
METROPOLITANA DE SALVADOR			CAB-G	46	-8	CAB-G	46	-8		
CENTRO NORTE BAIANO			FER-D	-69		FER-D	-69			
NORDESTE BAIANO			FER-B	24		FER-B	24			
VALE SÃO FRANCISCO DA BAHIA			FER-C	-12		FER-C	-12			
METROPOLITANA DE FORTALEZA	CE	82	CAB-G	-28	-28	CAB-G	-28	-28		
DISTRITO FEDERAL	DF	672	FER-C	64	64	FER-C	64	64		
NOROESTE ESPÍRITO-SANTENSE	ES	1827	FER-C	138		FER-C	138			
LITORAL NORTE ESPÍRITO-SANTENSE			FER-D	23		FER-D	23			
CENTRAL ESPÍRITO-SANTENSE			FER-B	69	55	FER-C	68	54		
SUL ESPÍRITO-SANTENSE	FER-B	2		FER-C	1					
SUL GOIANO	GO	6078	FER-D	-10		FER-D	-10			
LESTE GOIANO			FER-C	44	-15	FER-C	44	-15		
CENTRO GOIANO			FER-D	-22		FER-D	-22			
VALE DO RIO DOCE			FER-A	11		FER-A	11			
METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE	MG	19730	ROD-I	64		FER-A	59			
NORTE DE MINAS			FER-D	42		FER-D	42			
OESTE DE MINAS			FER-E	53	44	FER-E	53	43		
SUL/SUDOESTE DE MINAS			ROD-I	-14		ROD-I	-14			
TRIÂNGULO MINEIRO/ALTO PARANAÍBA			FER-C	41		FER-C	41			
CAMPO DAS MESITAS	ROD-I	67		ROD-I	67					
ZONA DA MATA			FER-A	73		FER-E	70			
SUDESTE MATO-GROSSENSE	MT	24	FER-D	-29	-29	FER-D	-29	-29		
MATA PARAIBANA	PB	261	CAB-G	5	-5	CAB-G	5	-5		
AGRESTE PARAIBANO			CAB-G	-18		CAB-G	-18			
METROPOLITANA DE RECIFE	PE	3164	CAB-G	-10		CAB-G	-10			
MATA PERNAMBUCANA			CAB-G	2	-10	CAB-G	2	-10		
AGRESTE PERNAMBUCANO			CAB-G	-10		CAB-G	-10			
METROPOLITANA DE CURITIBA	PR	9961	CAB-G	5		CAB-G	5			
CENTRO ORIENTAL PARANAENSE			FER-E	49		FER-E	49			
CENTRO-SUL PARANAENSE			FER-E	38	6	FER-E	38	6		
NOROESTE PARANAENSE			HID-H	7		HID-H	7			
NORTE PIONEIRO PARANAENSE			FER-D	33		FER-D	33			
NORTE FLUMINENSE	RJ	8989	FER-D	-35		FER-D	-35			
NOROESTE FLUMINENSE			FER-A	79		FER-A	79			
BAIXADAS			FER-E	-2	25	FER-E	-2	25		
CENTRO FLUMINENSE			ROD-I	34		ROD-I	34			
METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO			FER-E	47		FER-E	47			
SUL FLUMINENSE			FER-E	41		FER-E	41			
LESTE POTIGUAR			RN	77	CAB-G	7	14	CAB-G	7	14
AGRESTE POTIGUAR			FER-B	22		FER-B	22			
METROPOLITANA DE PORTO ALEGRE			RS	326	CAB-G	-5		CAB-G	-5	
SUDESTE RIO-GRANDENSE			CAB-G	-3	-12	CAB-G	-3	-12		
NORDESTE RIO-GRANDENSE	CAB-G	-33		CAB-G	-33					
CENTRO ORIENTAL RIO-GRANDENSE	CAB-G	-30		CAB-G	-30					
NORTE CATARINENSE	SC	1267	CAB-G	35		CAB-G	35			
VALE DO ITAIAÍ			CAB-G	45		CAB-G	45			
GRANDE FLORIANÓPOLIS			CAB-G	46	10	CAB-G	46	10		
SUL CATARINENSE			CAB-G	-4		CAB-G	-4			
SERRANA			CAB-G	4		CAB-G	4			
LESTE SERGIPIANO	SE	89	CAB-G	46	46	CAB-G	46	46		
VALE DO PARAÍSA PAULISTA			CAB-G	26		CAB-G	26			
METROPOLITANA DE SÃO PAULO			CAB-G	48		CAB-G	48			
LITORAL SUL PAULISTA			CAB-F	-6		CAB-F	-6			
MACROMETROPOLITANA PAULISTA			CAB-G	8		CAB-G	8			
CAMPINAS			FER-D	88		FER-D	88			
RIBEIRÃO PRETO			FER-E	83	31	FER-E	83	31		
PIRACICABA			FER-D	73		FER-D	73			
ITAPETINGA			FER-D	-4		FER-D	-4			
BAURU			HID-H	20		HID-H	20			
ARARAQUARA	FER-E	69		FER-E	69					
SÃO JOSÉ DO RIO PRETO	FER-D	54		FER-D	54					
TOTAL		65026		R\$ 21		R\$ 25				

Assim, conforme tabela constante no Apêndice H, no ponto mais sustentável, em que a restrição \mathcal{E} , um consumo inferior a 665 kl/sem, ou seja, 50 kl/sem a menos, resulta uma redução na emissão de CO₂ de 73 kt/sem, 2 Kg/sem de emissões de PA, uma economia no consumo de 26 pneus a menos, com a diminuição de 73 kg de detritos de pneus e 25 l/sem de vazamento de óleo a menos.

Em relação aos parâmetros sociais, três vagas de trabalho deixam de ser criadas, porém, com essa configuração da utilização do sistema logístico há uma maior contribuição ao PIB, gerando cerca de R\$ 98.000,00 por semana. As perdas que provocam sujidades ao longo das rotas, parâmetro dos impactos sociais negativos, foram menores em 32 t/sem; as vítimas fatais diminuíram em 0,1 ao ano, enquanto os ruídos emitidos foram maiores em 94 MDbs/sem. O pilar social positivo (benéfico) permanece estável com a redução do LT. Dessa forma, a aplicação da análise de *trade off* de custo e benefícios revela os benefícios gerados com um

pequeno aumento do CLT, diminuição do LT e consequente configuração diferenciada do desenho da matriz do sistema logístico.

Logo, obtém-se o ponto sustentavelmente otimizado, que considera, além dos fatores econômicos, representado pelo CLT, os fatores socioambientais, e está localizado entre a região compreendida pelos pontos $\epsilon=655$ kl/sem, dependendo da importância relativa entre os mesmos, que deve ser definida pela empresa, estando alinhado à sua estratégia, valores e missão.

O comportamento dos resultados dos pilares sustentável, bem como a própria sustentabilidade, composta de acordo com primeiro cenário, com pesos iguais entre si, foram projetados sobre gráficos de três dimensões na Figura 5-10. É possível, portanto, avaliar o efeito da variação em cada pilar com a imposição do ϵ -restrito. O ponto indicado no gráfico ilustra onde a curva da sustentabilidade se aproxima dos níveis ótimos, ou seja, 100%, de acordo com a normatização estabelecida pelos pilares, justamente no mesmo ponto onde os outros pilares também atingem a região ótima mais próxima dos 100 %, representado pela cor azul.

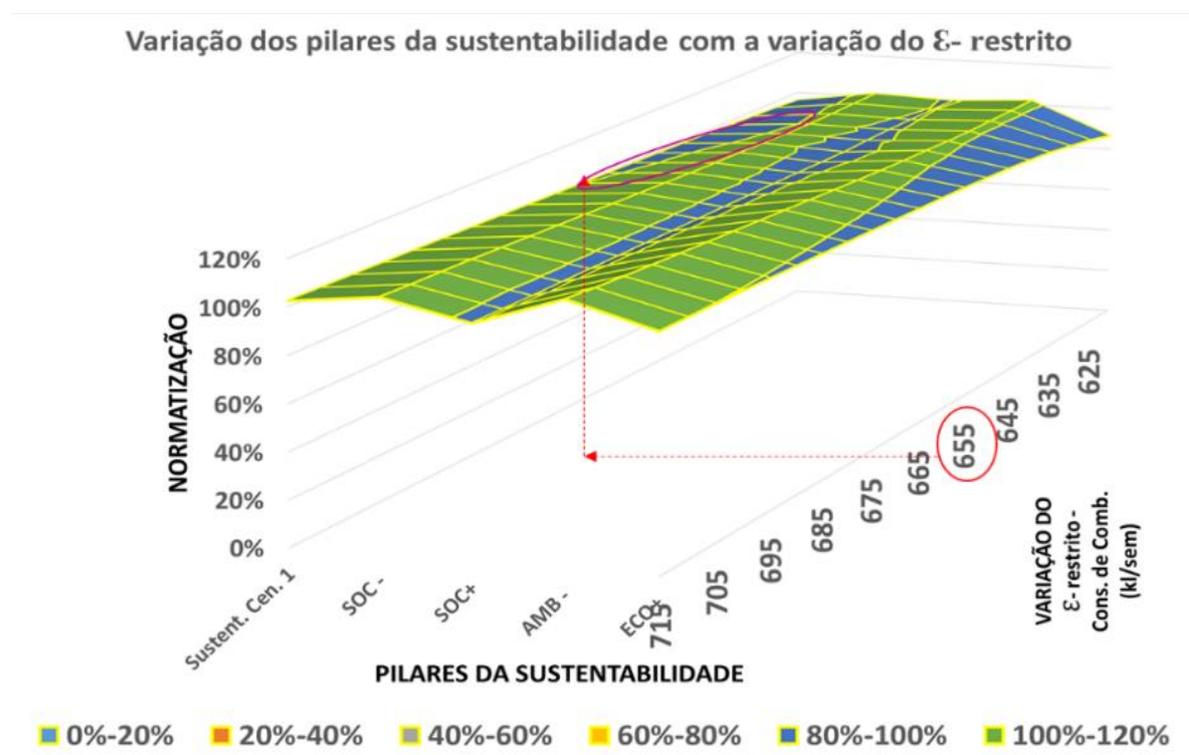


Figura 5-10 – Superfície de Pareto – Pilares da Sustentabilidade x Variação do ϵ -Restrito

A análise da Figura 5-10 permite a melhor visualização, por meio da superfície formada entre os pilares da sustentabilidade, que se relacionam entre si, da fronteira ótima de Pareto, sob as devidas considerações e restrições adotadas na modelagem e contempladas neste estudo. Segundo entendimento de Frota Neto et al., (2008), a definição de Pareto-ótimo é a solução que

não permite melhorar um objetivo sem piorar qualquer outro, o que pode ser observado pelas superfícies em formato de folha, com uma das partes dobrada no formato da letra *V* (invertida). Ao partir do ponto $\varepsilon=715$ em direção ao ponto $\varepsilon=655$, nota-se uma diminuição do pilar econômico, representado pelo LT; tem-se o incremento do pilar social com efeitos positivos e a diminuição dos impactos socioambientais negativos. A partir do ponto $\varepsilon=655$ kl/sem, observa-se uma grande diminuição do pilar econômico, sem melhorias significativas dos outros.

As duas superfícies têm comportamento semelhante, mas os pilares ambientais positivos são estáveis, enquanto os sociais positivos crescem com a diminuição do econômico; já os pilares socioambientais negativos decrescem até certo ponto, depois permanecem estáveis e, no último trecho, passam a piorar.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme apresentado e analisado no capítulo anterior dos resultados as soluções alcançadas pelo modelo e a metodologia adotada na proposta principal deste estudo de otimização dos fluxos estabelecidos sobre o sistema logístico conferem uma lucratividade competitiva ao produto, garantindo sua viabilização econômica e atingindo o objetivo de diminuir o efeito da armazenagem dos rejeitos em barragens e o risco de novos acidentes, com uma solução otimizada sustentavelmente, ou seja, a custos e impactos socioambientais negativos mínimos, e socioambientais positivos máximos. Portanto, o cumprimento e controle dessa ação para viabilizar o fluxo do coproduto das usinas de beneficiamento do minério para as fábricas de materiais de construção civil tem potencial de gerar um negócio adicional à empresa mineradora. Para a tomada de decisões de longo prazo em níveis estratégicos, são necessários investimentos ou custos adicionais relacionados ao produto principal para viabilizar a transformação de um rejeito em um coproduto sustentável, minimizando alguns desses impactos.

De modo geral, no caso estudado, o modo de transporte rodoviário se mostrou mais vantajoso economicamente para distâncias curtas, pois gera mais empregos que o ferroviário e redistribui melhor a renda ao longo das rodovias. Entretanto, devido à utilização de motores movidos à combustão do diesel, há maiores emissões de GEE (CO_2), maior consumo de combustíveis fósseis não renováveis e aumento do trânsito nas rodovias, aumentando o risco de acidentes. Existe ainda a possibilidade de maior derramamento do próprio coproduto pela pista, que com sua tonalidade avermelhada, pode provocar sujidades ao redor das vias.

Outro impacto nocivo ao meio ambiente, conforme demonstrado por Mulha et al. (2006), é o desgaste dos pneus dos veículos do modo de transporte rodoviário, também responsável por causar a emissão de detritos de pneus ao longo das rodovias. Destaca-se que os pneus, originários em parte de combustíveis fósseis, são grandes consumidores de energia e emissores de GEE, tanto para o seu processamento quanto para sua reciclagem.

Portanto, as ações de minimização dos impactos socioambientais negativos gerados em todo o sistema logístico são bases fundamentais para o desenvolvimento da economia circular e redistribuição de renda ao longo dos canais mercadológicos e logísticos. Surge assim uma “faísca” que impulsionará, como uma explosão, as engrenagens da roda da economia circular mostrada anteriormente na Figura 4-6, para girar e trazer benefícios máximos e impactos negativos mínimos, para toda a empresa e para toda a sociedade, conforme pode ser observado na Figura 4-19.

Além da revisão bibliográfica sobre desenho de sistema logístico multimodal sustentável, foi realizada uma ampla pesquisa sobre o sistema logístico de multimodal de escoamento para granéis no Brasil, bem como um referencial teórico sobre a logística reversa que nessa pesquisa constada nos apêndices *A*, *B* e *C*.

Para uma modelagem de otimização multiobjetivo que considera diversos aspectos sobre diferentes óticas, (econômica, social e ambiental) fez-se necessário essa ampla pesquisa que serviu de pano de fundo para a obtenção de considerações do modelo que abrangesse de uma maneira holística o problema em questão. Além de se levantar informações atualizadas sobre o sistema logístico brasileiro que fossem relevantes para as considerações do custo logístico do modelo, que precisou ser calculado de acordo com tarifas reais de mercado do atual sistema logístico brasileiro disponível para atendimento de cada mesorregião, a pesquisa considerou as respectivas externalidades de cada modo de transporte proposto, dadas pelos decorrentes impactos que podem ser benéficos ou prejudiciais mensurados através de parâmetros estabelecidos por tonelada por quilometro útil (TKU). Esses parâmetros baseados na literatura e regulamentações podem servir de referência para novos estudos sobre sistemas logísticos multimodais sustentáveis.

Apesar da aplicação ao caso específico de resíduos de mineração na cadeia de materiais de construção, caso não fossem considerados os impactos ambientais positivos decorrentes da substituição das matérias primas dos materiais de construção, a metodologia proposta de desenho de sistema logístico sustentável poderia ser aplicada, com as devidas considerações de

localização de origens e demandas, de tipos de *hubs* (preparados ou não para o produto), à outros tipos de granéis como, por exemplo, para o escoamento de grãos. Ademais, o modelo proposto nessa pesquisa também é passível de aplicação na análise de viabilidade de novas rotas, tipos de veículos ou modos de transporte.

Recentemente lançados no mercado brasileiro de veículos de transporte de carga, os veículos elétricos, dotados de bateria de íons de lítio são alternativas tecnológicas do século XXI que favorecem a redução do consumo de combustíveis fósseis, de fontes não renováveis e na emissão zero de GHG. Possuem ainda uma boa eficiência energética, com economia no custo de combustível chegando a cerca de 1/3 do custo do diesel, (BYD, 2020).

Outro ponto positivo é a economia no custo de manutenção, pois o motor possui menor quantidade de partes móveis e não emite fuligens. A energia elétrica consumida é considerada um combustível limpo, que não emite poluentes diretos, nem consome recursos de fontes de energia não renováveis diretos, como o óleo diesel e os óleos lubrificantes, para sua manutenção, gerando menor impacto ambiental. O veículo apresenta maior durabilidade ao longo do tempo em razão de seu menor desgaste; comparado ao veículo a combustão movido por diesel, o veículo elétrico possui um Custo Total de Propriedade menor, sendo uma alternativa atrativa sob a ótica sustentável.

Para algumas rotas específicas, devido às características geográficas do local, o consumo de energia é reduzido. Como os veículos deixam as minas carregados com os coprodutos, e estas geralmente estão localizadas em lugares mais altos do que os destinos, por meio do mecanismo regenerativo nos freios, nas descidas, existe a possibilidade de a energia potencial ser parcialmente reaproveitada, transformando-se em energia cinética. Entretanto, esses veículos possuem uma restrição de autonomia imposto pelas baterias de cerca de 200 km.

Por ser linear, outro benefício do modelo proposto nessa pesquisa é a possibilidade de se obter sua solução com o uso do plugin *Opensolver*, (2023), do *software* Excel, que permite sua reprodução com facilidade, pois trata-se de um *software* amplamente usado e de fácil acesso.

É importante pontuar que há uma oportunidade de melhoria no modelo que seria a inclusão da decisão da seleção das mesorregiões, que nessa pesquisa foi feita manualmente, por faixas de lucro total. A inclusão de variáveis binárias ao modelo, permitiria a otimização do fluxo do sistema logístico multimodal adicionalmente com uma otimização na seleção das mesorregiões tendo em vista um Lucro Total maximizado.

No entanto, essa inclusão de variáveis binárias, torna o modelo em um problema de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), o que acarretaria num aumento da sua complexidade devido além da inclusão de novas variáveis, devido a necessidade de consideração de novas restrições para garantir a linearidade do modelo, requerendo uma ferramenta mais robusta para sua execução como o desenvolvimento do modelo com uma linguagem computacional de programação mais elaborada e um *software* de maior capacidade computacional, como o utilizado por Pinheiro e Marujo (2012).

REFERÊNCIAS

ABESC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM. Lista de Associados da ABNT, 2021.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.151**: acústica: avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade: procedimento. Rio de Janeiro, 2019, 4 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR16.697**: comento Portland: requisitos. Rio de Janeiro, 2018, 11 p.

AGENDA 21 GLOBAL, 1992. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21/agenda-21-global.html>. Acesso em: 15 set. 2021.

AGRAWAL, V.; TOKTAY, L. B. Interdisciplinarity in closed-loop supply chain management research. **Closed-loop supply chains: new developments to improve the sustainability of business practices**, v. 4, p. 197-210, 2010.

ALIAKBARI NOURI, F., SHAFIEI NIKABADI, M., OLFAT, L. Developing the framework of sustainable service supply chain balanced scorecard (SSSC BSC). **International Journal of Productivity and Performance Management**, 68, p. 148-170, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/IJPPM-04-2018-0149>. Acesso em: 02 fev. 2022.

ALVARENGA, G. S. 2010. **Estudo do impacto do pedágio no aumento do tempo de viagem, no consumo de combustível e na emissão de poluentes**. Dissertação (Mestrado em Dinâmica das Máquinas e Sistemas) - Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.18.2010.tde-17012011-161609>. Acesso em: 12 jun. 2022.

AMARAL, D. S. et al. Análise multicritério aplicada a tomada de decisão estratégica de escolha entre modais de transporte: um estudo de caso da indústria de eletrônicos de Manaus. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA - SPOLM, 15., 2012, Manaus, AM. **Anais [...]**. Manaus, 2012.

AMBROSINO, D.; SCUTELLÀ, M.G. Distribution network design: new problems and related models. **European Journal of Operational Research**, 165, p. 610-624, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.04.009>. Acesso em: 12 jun. 2022.

Andersen, M.S. An introductory note on the environmental economics of the circular economy. **Sustainability Sci**, 2 (1), p. 133-140, 2007.

ANTAQ – AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUÁTICOS. **Tarifas Portuárias – Portaria nº 118**. 2021a. Disponível em: web.antaq.gov.br/Portal/TarifasPortuarias/index.html. Acesso em: 02 jan. 2021.

_____. **Web Portos**. 2021b. Disponível em: <https://www.gov.br/antaq/pt-br>. Acesso em: 02 jan. 2021.

_____. **Relatório Técnico Bacia do São Francisco – PNIH – Plano Nacional de Integração Hidroviária**. 2013a. Disponível em: <https://www.gov.br/antaq/pt-br>. Acesso em: 02 jan. 2021.

_____. **Relatório Técnico Bacia do Paraná-Tietê – PNIH – Plano Nacional de Integração Hidroviária**. 2013b. Disponível em: <https://www.gov.br/antaq/pt-br>. Acesso em: 02 jan. 2021.

- _____. **Relatório de Metodologia – Plano Nacional de Integração Hidroviária**. 2013c. Disponível em: <https://www.gov.br/antag/pt-br>. Acesso em: 02 jan. 2021.
- _____. **Panorama das Hidrovias Brasileiras**. 2009. Disponível em: <https://www.gov.br/antag/pt-br>. Acesso em: 02 jan. 2021.
- _____. **Distância entre Portos Marítimos**. 2008. Disponível em: <https://www.gov.br/antag/pt-br>. Acesso em: 02 jan. 2021.
- _____. **Anuário Portuário. Agência Nacional de Transportes Aquaviários**. 2006. Disponível em: <https://www.gov.br/antag/pt-br>. Acesso em: 02 jan. 2021.
- ANTT – AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Declaração de Rede 2021. 2021a. Disponível em: <https://portal.antt.gov.br/declaracao-de-rede-2021>. Acesso em: 05 jun. 2022.
- _____. **Declaração de Rede 2022**. 2022a. Disponível em: <https://portal.antt.gov.br/declaracao-de-rede-2022>. Acesso em: 05 jun. 2022.
- _____. **Portal de Concessões de Ferrovias**. 2021b. Disponível em: <https://portal.antt.gov.br/>. Acesso em: 05 jun. 2022.
- _____. **Portaria nº 169**, de 18 de março de 2022. Coeficientes de Pisos Mínimos de Transporte Rodoviário de Cargas. 2022b. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=428998>. Acesso em: 05 jun. 2022.
- _____. **Relatório Anual de Acompanhamento das Concessões Ferroviárias 2013**. 2013. Disponível em: <https://portal.antt.gov.br/>. Acesso em: 05 jun. 2022.
- AZEVEDO, J. L. A Economia Circular aplicada no Brasil: uma análise a partir dos instrumentos legais existentes para a logística reversa. In: XI Congresso Nacional de Excelência em Gestão, 11. **Anais [...]**, 2015.
- AZUMA, R. Mitsue. **Otimização multiobjetivo em problema de estoque e roteamento gerenciados pelo fornecedor**. Campinas, SP:[SN], 2011.
- BALLOU, Ronald H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Logística Empresarial**. São Paulo: Bookman Editora, 2009.
- BALLOU, Ronald H. Unresolved Issues in Supply Chain Network Design. **Information Systems Frontiers**, 3, p. 417-426, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1012872704057>. Acesso em: 07 jul. 2022.
- BALLOU, Ronald H. **Logística Empresarial: Transporte, Administração de Materiais e Distribuição Física**/Ronald H. Ballou. 1ª ed. São Paulo: Editora Atlas, p. 113-115, 1993.
- BASTEIN, A. G. T. M. et al. **Opportunities for a Circular Economy in the Netherlands**. Delft: TNO, 2013.
- BCC – BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Calculadora do cidadão – Índice de Preços. 2021**. Disponível em:

<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADA0/publico/exibirFormCorrecaoValores.do?method=xibirFormCorrecaoValores&aba=1>. Acesso em: 02 out. 2022.

BESKE-JANSSEN, Philip; JOHNSON, Matthew Phillip; SCHALTEGGER, Stefan. 20 years of performance measurement in sustainable supply chain management—what has been achieved?. **Supply chain management: An international Journal**, 2015.

BOND, Tami C. et al. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. **Journal of geophysical research: Atmospheres**, v. 118, n. 11, p. 5380-5552, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>. Acesso em: 05 jan. 2022.

BOULDING, Kenneth E. The economics of the coming spaceship earth. *In: Environmental quality in a growing economy*. RFF Press, 2013. p. 3-14.

BR DO MAR PODE REDUZIR CUSTO DE TRANSPORTE EM ATÉ 50%, DIZ CNA. **Canal Rural**, 2021. Disponível em: 02 out. 2022.

BRASIL. **Emissões de GEE por subsetor**. 2022c. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/emissoes/participacao-de-emissoes-de-gee-por-subsetor>. Acesso em: 25 mar. 2022.

_____. **Lei nº 6.938**, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em:

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%206.938%2C%20DE%2031%20DE%20AGOSTO%20DE%201981&text=Disp%C3%B5e%20sobre%20a%20Pol%C3%ADtica%20Nacional,aplica%C3%A7%C3%A3o%2C%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%Aancias. Acesso em: 30 set. 2022.

_____. **Lei nº 8.630**, de 25 de fevereiro de 1993. Dispõe sobre o regime jurídico da exploração dos portos organizados e das instalações portuárias e dá outras providências. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1993/lei-8630-25-fevereiro-1993-363250-publicacaooriginal-1-pl.html>. Acesso em: 30 set. 2022.

_____. **Lei nº 9.074**, de 7 de julho de 1995. Estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências. Disponível em: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra;jsessionid=4B389D0A2091AAC727D33F80BBEBCD88.proposicoesWeb1?codteor=665653&filename=LegislacaoCitada+-PL+5438/2009. Acesso em: 30 set. 2022.

_____. **Lei nº 9.611**, de 19 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre o Transporte Multimodal de Cargas e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9611.htm. Acesso em: 30 set. 2022.

_____. **Lei nº 10.233**, de 5 de junho de 2001. Dispõe sobre a reestruturação dos transportes aquaviário e terrestre, cria o Conselho Nacional de Integração de Políticas de Transporte, a Agência Nacional de Transportes Terrestres, a Agência Nacional de Transportes Aquaviários e o Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, e dá outras providências. 2001a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10233.htm#:~:text=Disp%C3%B5e%20sobre%20a%20reestrutura%C3%A7%C3%A3o%20dos,Transportes%2C%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%Aancias. Acesso em: 30 set. 2022.

_____. **Lei nº 12.305**, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. 2010a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 30 set. 2022.

_____. **Lei nº 12.815**, de 5 de junho de 2013. Dispõe sobre a exploração direta e indireta pela União de portos e instalações portuárias e sobre as atividades desempenhadas pelos operadores portuários; altera as Leis nºs 5.025, de 10 de junho de 1966, 10.233, de 5 de junho de 2001, 10.683, de 28 de maio de 2003, 9.719, de 27 de novembro de 1998, e 8.213, de 24 de julho de 1991; revoga as Leis nºs 8.630, de 25 de fevereiro de 1993, e 11.610, de 12 de dezembro de 2007, e dispositivos das Leis nºs 11.314, de 3 de julho de 2006, e 11.518, de 5 de setembro de 2007; e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/lei/112815.htm. Acesso em: 30 set. 2022.

_____. **Lei nº 14.047**, de 24 de agosto de 2020. Dispõe sobre medidas temporárias para enfrentamento da pandemia da Covid-19 no âmbito do setor portuário, sobre a cessão de pátios da administração pública e sobre o custeio das despesas com serviços de estacionamento para a permanência de aeronaves de empresas nacionais de transporte aéreo regular de passageiros em pátios da Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (Infraero); e altera as Leis nºs 9.719, de 27 de novembro de 1998, 7.783, de 28 de junho de 1989, 12.815, de 5 de junho de 2013, 7.565, de 19 de dezembro de 1986, e 10.233, de 5 de junho de 2001. 2020a. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.047-de-24-de-agosto-de-2020-273920785>. Acesso em: 30 set. 2022.

_____. **Lei nº 14.066**, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). 2020b. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.066-de-30-de-setembro-de-2020-280529982>. Acesso em: 30 set. 2022.

_____. **Lei nº 14.301**, de 7 de janeiro de 2022. Institui o Programa de Estímulo ao Transporte por Cabotagem (BR do Mar); altera as Leis nºs 5.474, de 18 de julho de 1968, 9.432, de 8 de janeiro de 1997, 10.233, de 5 de junho de 2001, 10.893, de 13 de julho de 2004, e 11.033, de 21 de dezembro de 2004; e revoga o Decreto do Poder Legislativo nº 123, de 11 de novembro de 1892, e o Decreto-Lei nº 2.784, de 20 de novembro de 1940, e dispositivos da Medida Provisória nº 2.217-3, de 4 de setembro de 2001, e das Leis nºs 6.458, de 1º de novembro de 1977, 11.434, de 28 de dezembro de 2006, 11.483, de 31 de maio de 2007, 11.518, de 5 de setembro de 2007, 12.599, de 23 de março de 2012, 12.815, de 5 de junho de 2013, e 13.848, de 25 de junho de 2019. 2022a. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=14301&ano=2022&ato=f3fUTQE1kMZpWT855#:~:text=Institui%20o%20Programa%20de%20Est%C3%ADmulo,123%2C%20de%2011%20de%20novembro>. Acesso em: 03 mar. 2022.

_____. **Mapa da Evolução Rodoviária no Brasil**. 2021a. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/map-rodo-evolucao-pdf>. Acesso em: 26 mar. 2022.

_____. **Mapas e Bases dos Modos de Transportes**. 2021b. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/dados-de-transportes/bit/bit-mapas>. Acesso em: 26 mar. 2022.

_____. **Medida Provisória nº 1.065**, de 30 de agosto de 2021. Dispõe sobre a exploração do serviço de transporte ferroviário, o trânsito e o transporte ferroviários e as atividades desempenhadas pelas administradoras ferroviárias e pelos operadores ferroviários independentes, institui o Programa de Autorizações Ferroviárias, e dá outras providências. 2021c. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/medida-provisoria-n-1.065-de-30-de-agosto-de-2021-341649416>. Acesso em: 30 set. 2022.

_____. **Medida Provisória nº 1.112**, de 31 de março de 2022. Institui o Programa de Aumento da Produtividade da Frota Rodoviária no País - Renovar e altera a Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, a Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997, a Lei nº 10.336, de 19 de dezembro de 2001, e a Lei nº 11.080, de 30 de dezembro de 2004. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/medpro/2022/medidaprovisoria-1112-31-marco-2022-792462-publicacaooriginal-164879-pe.html>. Acesso em: 10 jan. 2023.

_____. Ministério da Infraestrutura. **Pro Trilhos – Programa de Autorizações Ferroviárias**. 2022b. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transporte-terrestre/programa-de-autorizacoes-ferroviarias/programa-de-autorizacoes-ferroviarias>. Acesso em: 25 mar. 2022.

_____. Ministério da Infraestrutura. **Rodovias Federais**. 2018a. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/conteudo/rodovias-brasileiras>. Acesso em: 30 set. 2022.

_____. Ministério de Minas e Energia. **Perfil de argilas para Cerâmica Vermelha - Relatório Técnico 32**. 2009. Disponível em: http://antigo.mme.gov.br/documents/36108/448620/P23_RT32_Perfil_da_Argila.pdf/1cc364e2-1b2a-59b4-9ddb-9c353947d7b0?version=1.0. Acesso em: 30 set. 2022.

_____. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. **Corredores Logísticos Estratégicos –Complexo de Minério de Ferro 2018**. 2018b. Disponível em: https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/relatorio_corredores_logisticos_minerio_v1-1.pdf. Acesso em: 25 set. 2022.

_____. **Plano de Investimento em Logística**. 2012..Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/onde-atuamos/infraestrutura/programa-investimentos-logistica/pil%20programa%20investimentos%20logistica>. Acesso em: 30 set. 2022.

_____. **Projeto de Lei nº 4.199**, de 2020, Institui o Programa de Estímulo ao Transporte por Cabotagem (BR do Mar); altera as Leis nºs 5.474, de 18 de julho de 1968, 9.432, de 8 de janeiro de 1997, 10.233, de 5 de junho de 2001, 10.893, de 13 de julho de 2004, e 11.033, de 21 de dezembro de 2004; e revoga o Decreto do Poder Legislativo nº 123, de 11 de novembro de 1892, e o Decreto-Lei nº 2.784, de 20 de novembro de 1940, e dispositivos da Medida Provisória nº 2.217-3, de 4 de setembro de 2001 e das Leis nºs 6.458, de 1º de novembro de 1977, 11.434, de 28 de dezembro de 2006, 11.483, de 31 de maio de 2007, 11.518, de 5 de setembro de 2007, 12.599, de 23 de março de 2012, 12.815, de 5 de junho de 2013 e 13.848, de 25 de junho de 2019. 2021d. Disponível em:

<https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/145886>. Acesso em: 30 set. 2022.

_____. **Universo da Mineração Brasileira**. 2007. Disponível: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnpm/publicacoes-economia-mineral/arquivos/universo-da-mineracao-brasileira-2007/view>. Acesso em: 30 set. 2022.

BYD. **BYD Truck Brochure**, 2020. Disponível em: <https://en.byd.com/truck/>. Acesso em: 15 out. 2022.

CABRAL, E. M. et al. Utilização de massas cerâmicas na produção de agregado sintético de argila calcinada para uso em concreto. **Cerâmica**, v. 54, p. 404-410, 2008.

CABRAL JUNIOR, Marsis et al. **RMIs: argilas para cerâmica vermelha**, 2005.

CAIXETA FILHO, José Vicente; MARTINS, Ricardo Silveira. **Gestão logística do transporte de cargas**. 2001.

CARTER, C.R.; ELLRAM, M. Reverse Logistics: A Review of the Literature and Framework for Future Investigation. **Journal of Business Logistics**, v. 19, n. 1, p. 85-102, 1998.

CARTER, C. R.; ROGERS, S. D. A framework of sustainable supply chain management: Moving toward new theory. **Int. J. Phys. Distrib. Logisti. Manag.** 38(5): 360-387, 2008.

CARVALHO JÚNIOR, Edson Benício de et al. **Avaliação do incômodo sonoro devido a exposição ao ruído aeronáutico no entorno do aeroporto de Brasília**.

CASTRO, N. de. Mensuração de externalidades do transporte de carga brasileiro. **J. Transp. Lit.** 7, p. 163-181, 2013.

CE DELFT. **Traffic noise reduction in Europe**, 2007. Disponível em: <https://cedelft.eu/>. Acesso em: 30 set. 2022.

CE DELFT, Directorate-General for Mobility and Transport (European Commission), INFRAS, Ricardo et al. **Handbook on the external costs of transport: version 2019**. Publications Office of the European Union, LU. 2019.

CECILIANO, Wellington Rodrigo Aparecido. 2007. 228 p. **Aplicação de um método de simulação-otimização na cadeia produtiva de minérios de ferro**. 2007. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Decisão de Diretoria nº 68/2014/V/I**, de 25 de março de 2014. 2014. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/>. Acesso em: 02 fev. 2022.

CHAABANE, A.; RAMUDHIN, A.; PAQUET, M. Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme. **International Journal of Production Economics**, 135, p. 37-49, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.10.025>. Acesso em: 25 set. 2022.

CHERTOW, M.; EHRENFELD, J. Organizing Self-Organizing Systems: Toward a Theory of Industrial Symbiosis. **Journal of Industrial Ecology**, 16, p. 13-27, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00450.x>. Acesso em: 25 set. 2022.

CHINA. **Circular Economy Promotion Law of the People's Republic of China**, 2008. Disponível em: <https://leap.unep.org/countries/cn/national-legislation/circular-economy-promotion-law-peoples-republic-china#:~:text=Circular%20Economy%20Promotion%20Law%20of%20the%20People's%20Republic%20of%20China.,-Country&text=This%20Law%20is%20formulated%20for,environment%20and%20realizing%20sustainable%20development>. Acesso em: 01 dez. 2021.

CIA, H. E.; CUNHA, C. B. **Modelo para desenho de um sistema logístico multimodal de escoamento de granéis minerais para abastecimento do mercado brasileiro de materiais de construção civil**, 2021.

CIMENTO. **Dados de Cimento no Brasil Plantas no Brasil – Capacidade instalada por Grupo/Fábrica**, 2017. Disponível em: <https://cimento.org/cimento-no-brasil/>. Acesso em: 02 fev. 2022.

CLM – COUNCIL OF LOGISTICS MANAGEMENT. **Reuse And Recycling Reverse Logistics Opportunities**, 1993.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Boletins estatísticos e econômicos anuais**, 2020. Disponível em: <https://cnt.org.br/>. Acesso em: 09 mar. 2021.

_____. **Estudo da CNT apresenta panorama do transporte e da economia**, 2019a. Disponível em: <https://cnt.org.br/agencia-cnt/estudo-da-cnt-apresenta-panorama-do-setor-e-da-economia>. Acesso em: 13 set. 2021.

_____. O transporte em números 2010 a 2019, 2019b. Disponível em: <https://cnt.org.br/>. Acesso em: 09 mar. 2021.

_____. **Painel do Emprego no Transporte**, 2021b. Disponível em: <https://cnt.org.br/painel-emprego-transporte>. Acesso em: 09 mar. 2021.

_____. **Sistema Nacional Viário**, 2021a. Disponível em: <https://cnt.org.br/>. Acesso em: 09 mar. 2021.

_____. **Transportes de cargas no Brasil – Ameaças e Oportunidades para o Desenvolvimento do País**, 2002. Disponível em: <https://cnt.org.br/>. Acesso em: 09 mar. 2021.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO-AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 1**, de 11 de fevereiro de 1993. Dispõe sobre os limites máximos de ruídos, com o veículo em aceleração e na condição parado, para veículos automotores nacionais e importados, excetuando-se motocicletas, motonetas, triciclos, ciclomotores e bicicletas com motor auxiliar e veículos assemelhados. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=124#:~:text=Disp%C3%B5e%20sobre%20os%20limites%20m%C3%A1ximos,motor%20auxiliar%20e%20ve%C3%ADculos%20assemelhados. Acesso em: 21 jan. 2023.

_____. **Resolução CONAMA n° 5**, de 15 de junho de 1989. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0005-150689.PDF>. Acesso em: 21 jan. 2023.

_____. **Resolução CONAMA n° 357**, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLUCAO_CONAMA_n_357.pdf. Acesso em: 21 jan. 2023.

_____. **Resolução CONAMA n° 491**, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=369516>. Acesso em: 21 jan. 2023.

COSTA, L.; MENDONÇA, F. M. de; SOUZA, R. G. O que é logística reversa. VALE, R.; SOUZA, G. R. **Logística reversa: processo a processo**. São Paulo: Atlas, 2014.

CSCMP – COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS . **Reverse Logistics definition CSCMP Council of Supply Chain Management Professionals**, 2004.

DALMÁS, S. R. da S. P.; LOBO, D. S.; ROCHA JR., W. F. **A logística de transporte agrícola multimodal da Região Oeste paranaense**, 2008. Disponível em: <https://silo.tips/download/a-logistica-de-transporte-agricola-multimodal-da-regiao-oeste-paranaense-1>. Acesso em: 25 jan. 2022.

DALY, Herman E. Economics in a full world. **Scientific american**, v. 293, n. 3, p. 100-107, 2005.

EC – EUROPEAN COMMISSION. **Communication from the commission to the parliament, the council and the European economic and social committee and the committee of the regions: Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy**. European Commission, 2015.

EC – EUROPEAN COMMISSION. **Towards a Circular Economy: A Zero Waste Programme for Europe**, 2014.

ELKINGTON, J. Towards the sustainable corporation: win-win-win business strategies for sustainable development. **California Management Review**, v. 36, n. 2, p. 90-100, 1994.

EMBRAPPI. CICS Poli USP, 2021.

EMF – ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Circular Economy Concept**, 2020.

_____. **Circular Economy infographic**, 2021.

_____. **Growth Within: a circular economy vision for a competitive Europe**, 2015.

_____. **Circular Economy – UK, USA, Europe, Asia & South America – The Ellen MacArthur Foundation**, 2012. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/>. Acesso em: 12 mar. 2021.

EPL – EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA. **Anuário Estatístico de Transportes 2010-2020**, 2021a.

_____. **Boletim Logístico**, 2019b.

_____. **Metodologia EPL-IEMA para Emissões de GEE e Poluentes Locais**, 2019a.

_____. **Resenha Mensal do Setor de Transportes**, 2021b.

ESKANDARPOUR, M.; DEJAX, P.; MIEMCZYK, J.; PÉTON, O. Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. **Omega (United Kingdom)**, 54, p. 11-32, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.01.006>. Acesso em: 25 fev. 2022.

ESTUDO DO EFEITO DA NO CUSTO DE NAVEGAÇÃO CABOTAGEM – PL N. 4.199/2020, CONHECIDO COMO BR DO MAR. **Globo**, 2021.

FELIZARDO, Jean Mari et al. **Inserção da logística reversa em habitats de empreendedorismo: um estudo de caso no CEFET-PR**. Curitiba: CEFET/PR, 2002.

FERRARI, Renata Cristina. 2006. **Utilização de modelo matemático de otimização para identificação de locais para instalação de unidades armazenadoras de soja no estado do Mato Grosso**. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

FERREIRA, Júlio César; STEINER, Maria Teresinha Arns; CANGIOLIERI JUNIOR, Osiris. Multi-objective optimization for the green vehicle routing problem: a systematic literature review and future directions. **Cogent Engineering**, v. 7, n. 1, 2020.

FGV – FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. Relação entre o transporte rodoviário de carga e PIB pode chegar a 29%, segundo cálculos da FGV. **Portal FGV**, 2020. Disponível em: <https://portal.fgv.br/noticias/relacao-entre-transporte-rodoviario-carga-e-pib-pode-chegar-29-segundo-calculos-fgv>. Acesso em: 13 set. 2021.

FLEISHMANN, M. **Quantitative models for Reverse Logistics**. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001.

FLEURY, P. F. **O Sistema de Processamento de Pedidos e a Gestão do Ciclo do Pedido**, 2012.

FORMENTINI, Marco; TATICCHI, Paolo. Corporate sustainability approaches and governance mechanisms in sustainable supply chain management. **Journal of cleaner production**, v. 112, p. 1920-1933, 2016.

FREEMAN, J.; CHEN, T. Green supplier selection using an AHP-Entropy – TOPSIS framework. **Supply Chain Management**, 20, 327-340, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/SCM-04-2014-0142>. Acesso em: 15 mai. 2022.

FRIEDMAN, Milton. **The social responsibility of business is to increase its profits**. Springer Berlin Heidelberg, 2007.

FROSCH, Robert A. Industrial ecology: minimizing the impact of industrial waste. **Physics Today**, v. 47, n. 11, p. 63-68, 1994.

FROTA NETO, J. Q. BLOEMHOF-RUWAARD, J. M.; VAN NUNEN, J. A. E. E.; VAN HECK, E. Designing and evaluating sustainable logistics networks. **International Journal of**

Production Economics, 111, p. 195-208, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.10.014>. Acesso em: 16 out. 2022.

GALANKASHI, Masoud Rahiminezhad et al. Prioritizing green supplier selection criteria using fuzzy analytical network process. **Procedia CIRP**, v. 26, p. 689-694, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.044>. Acesso em: 15 out. 2022.

GEIPOT – EMPRESA BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO E TRANSPORTE.
Corredores Estratégicos de Desenvolvimento – Relatório Final, 2002.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N. M. P.; HULTINK, E. J. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, 143, p. 757-768, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>. Acesso em: 19 nov. 2021.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, 114, p. 11-32, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>. Acesso em: 19 nov. 2021.

GNDI – GLOBAL NETWORK OF DIRECTOR INSTITUTES. Global Network Of Director Institutes 2020 -2021. **Survey Report**, 2021.

GONZALEZ, Ernesto D. R. S. et al. Making real progress toward more sustainable societies using decision support models and tools: introduction to the special volume. **Journal of Cleaner Production**, v. 105, p. 1-13, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.047>. Acesso em: 03 mar. 2021.

GOOGLE EARTH, 2021. Disponível em: www.googleearth.com. Acesso em: 04 ago. 2022.

GRI – GLOBAL REPORTING INITIATIVE, 1997. Disponível em: <https://www.globalreporting.org/>. Acesso em: 04 ago. 2022.

GUARNIERI, Patricia. **Logística Reversa**: em busca do equilíbrio econômico e ambiental. Patricia Guarnieri, 2011.

GUIA DO TRC, 2020. Disponível em: <http://www.guiadotrc.com.br/Custeio/parametros.asp>. Acesso em: 01 dez. 2022.

GUIA PNEUS, 2019. Disponível em: <https://guiapneus.com/>. Acesso em: 01 dez. 2022.

HAWKEN, Paul; LOVINS, Amory B.; LOVINS, L. Hunter. **Natural capitalism**: the next industrial revolution. Routledge, 2013.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Desemprego. **IBGE**, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/desemprego.php>. Acesso em: 03 set. 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Estimativas da População residente no Brasil (referência 1 de julho de 2020). **IBGE**, 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 03 set. 2021.

IEMA – INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. As emissões brasileiras de gases de efeito estufa nos setores de Energia e de Processos Industriais em 2019. **Instituto de Energia e Meio Ambiente**, 2020. Disponível em: <http://energiaeambiente.org.br/>. Acesso em: 04 set. 2022.

IGNÁCIO, Aníbal Alberto Vilcapoma; FERREIRA FILHO, Virgílio José Martins. Seção de Software: o uso de software de modelagem AIMMS na solução de problemas de programação matemática. **Pesquisa Operacional**, v. 24, p. 197-210, 2004.

ILOS – INSTITUTO DE LOGÍSTICA E SUPPLY CHAIN. Arquivos matriz de transportes. **ILOS**, 2018. Disponível em: <https://www.ilos.com.br/web/tag/matriz-de-transportes/>. Acesso em: 14 set. 2021.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Infraestrutura: uma corrida sobre trilhos. **IPEA**, 2005. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/>. Acesso em: 14 set. 2021.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDADIZATION. Guidance on social responsibility. **ISO**, 2010. Disponível em: <https://www.iso.org/home.html>. Acesso em: 14 set. 2021.

JACOBSON, Mark Z. Climate response of fossil fuel and biofuel soot, accounting for soot's feedback to snow and sea ice albedo and emissivity. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 109, n. D21, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2004JD004945>. Acesso em: 17 set. 2021.

JIANG, Fei; JOHNSON, Paul; CALZADA, Christian. **Freight demand characteristics and mode choice: an analysis of the results of modeling with disaggregate revealed preference data**, 1999.

JOHN, V. M.; PACCA, S. A.; ANGULO, S. C.; PUNHAGUI, K. G. R.; OLIVEIRA, L. S. Sustentabilidade na indústria de blocos e pavimento de concreto – Avaliação de Ciclo de Vida Modular. **CBCS; ABCP; Bloco Brasil**, 2014.

JORGENSEN, A. Presentation: A perspective on freight transport in South Africa. 6 September 2007. 2007.

JULIÁ, A. F. 2010. **Desenvolvimento de um modelo de simulação para dimensionamento de um sistema integrado pátio-porto na cadeia do minério de ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos). Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2010.tde-17082010-104806>. Acesso em: 25 set. 2022.

KABADURMUS, O.; ERDOGAN, M. S. Sustainable, multimodal and reliable supply chain design. **Ann Oper Res**, 292, p. 47-70, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03654-0>. Acesso em: 01 dez. 2022.

KALMYKOVA, Y.; SADAGOPAN, M.; ROSADO, L. Circular economy: from review of theories and practices to development of implementation tools. **Resources, conservation and recycling**, 135, p. 190-201, 2018.

KLASSEN, R. D.; VEREECKE, A. Social issues in supply chains: capabilities link responsibility, risk (opportunities), and performance. **Int. J. Prod. Econ.**, 140, p. 103-115, 2012.

KOPP, R. E. et al. Black carbon: A review and policy recommendations. **Woodrow Wilson School of Public and International Affairs**, Princeton University, 2009.

LACERDA, L. **Logística reversa: uma visão sobre os conceitos básicos e as práticas operacionais**. Rio de Janeiro: COPPEAD/UFRJ, 6, 2002.

LAMBERT, D. **Administração estratégica da logística**. São Paulo: Vantine Consultoria, 1998.

JUNIOR, Ilton Curty Leal. **Método de escolha modal para transporte de produtos perigosos com base em medidas de ecoeficiência**. 2010. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

LEE, S.; GEUM, Y.; LEE, H.; PARK, Y. Dynamic and multidimensional measurement of product-service system (PSS) sustainability: a triple bottom line (TBL)-based system dynamics approach. **Journal of Cleaner Production**, 32, p. 173-182, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.032>. Acesso em: 10 fev. 2022.

LEITE, P. R. **Logística Reversa: Meio Ambiente e Competitividade**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003.

LEQUY, Emeline et al. Contribution of long-term exposure to outdoor black carbon to the carcinogenicity of air pollution: Evidence regarding risk of cancer in the gazel cohort. **Environmental health perspectives**, v. 129, n. 3, p. 037005, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1289/EHP8719>. Acesso em: 13 mar. 2022.

MANNION, A. **Global Environmental Change: A Natural and Cultural Environmental History**, 2nd. ed. London: Routledge, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.4324/9781315842615>. Acesso em: 07 set. 2022.

MARCONDES, Fábila Cristina Segatto; CARDOSO, Francisco Ferreira. Contribuição para aplicação do conceito de logística reversa na cadeia de suprimentos da construção civil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO, 10., Porto Alegre, RS. **Anais [...]**. Porto Alegre, RS, 2005.

DE MATTOS, Laura Bedeschi Rego. **A importância do setor de transportes na emissão de gases do efeito estufa: o caso do Município do Rio de Janeiro**. 2001. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

MCKINNON, Alan et al. (Ed.). **Green logistics: improving the environmental sustainability of logistics**. Kogan Page Publishers, 2015.

MEADOWS, Donella H. et al. **The limits to growth-club of rome**. 1972.

MELO, W. C. de. 2015. **Impacto sonoro provocado por polo gerador de viagem: Aeroporto Internacional de Brasília (Master)** – Universidade de Brasília, Brasília. Disponível em: <https://doi.org/10.26512/2015.07.D.19237>. Acesso em: 02. dez. 2022.

MERCEDES-BENZ. Mercedes_Actros 4844 8x4 Basculante. **Mercedes-Benz**, 2020. Disponível em: <https://www2.mercedes-benz.com.br/>. Acesso em: 02. dez. 2022.

Mesquita, A. H. M. 1980. **Estudo intermodal do transporte de cargas em um corredor. Aplicação no macro-eixo Rio-São Paulo**. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1980.

JANIC, Milan. Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 12, n. 1, p. 33-44, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2006.10.004>. Acesso em: 30 jun. 2022.

MOHEBALIZADEHGASHTI, F.; ZOLFAGHARINIA, H.; AMIN, S. H. Designing a green meat supply chain network: A multi-objective approach. **International Journal of Production Economics**, 219, p. 312-327, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.07.007>. Acesso em: 30 jun. 2022.

MTE – MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA. **CAGED – Cadastro Geral dos Empregados e Desempregados**, 2021. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNWl5NWl0ODEtYmZiYy00Mjg3LTkzNWUtY2UyYjIwMDE1YWI2IiwidCI6IjNlYzkyOTY5LTZhNTEtNGYxOC04YWM5LWVmOThmYmFmYTk3OCJ9>. Acesso em: 03 set. 2021.

MTPA – MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, PORTOS E AVIAÇÃO CIVIL. **Diretrizes Socioambientais**, 2016. Disponível em: https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/mtpa_diretrizessocioambientais.pdf. Acesso em: 09 jul. 2022.

MUELLER, Carla Fernanda. **Logística reversa meio-ambiente e produtividade**. Santa Catarina: UFSC, 2005.

MULHA, A. S.; TINOCO, J. E. P.; CARDOSO, C. A relação entre os resíduos gerados na utilização do pneu e o meio ambiente: uma reflexão quanto à sustentabilidade e o custo socioambiental. *In*: Congresso Brasileiro de Custos-ABC, 2006. **Anais [...]**. 2006.

MULINAS, A.; MONTERDE HIGUERO, N.; SAPIÑA GARCÍA, R.; MARTÍN SOBERÓN, A. M. **La terminal portuaria de contenedores como sistema nodal en la cadena logística**. 2. ed. Valência: Fundación Valenciaport, 2012.

NATIONAL WATERWAYS FOUNDATION. **A modal comparison of domestic freight transportation effects on the general public: 2001-009**, 2012.

SILVA NETO, Gustavo Cunha da et al. **Um método para solução de problemas de otimização multiobjetivo em ambiente fuzzy**. 2011.

Novaes, A.G., 2004. Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição: estratégia, operação e avaliação. 1a ed. Rio de Janeiro: Campus.

NOVAES, A. G. **Sistemas de Transporte**. Volume 1: Análise da Demanda. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1986.

NOVAES, A. G.; ALVARENGA, A. **Logística Aplicada**. São Paulo: Pioneira, 1994.

OLIVEIRA, C. P. de. **Modelos de Otimização Aplicados ao Problema de Máxima Cobertura**: Estudo de Caso do Samu-BH. 2020. Tese (Doutorado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

OPENSOLVER. Version 2.9.3 (2020.03.01) running on 64-bit Windows 10.0 with VBA7 in 64-bit Excel 16.0, 2023. Disponível em: <https://opensolver.org/>. Acesso em: 10 mai. 2022.

OMS, Weltgesundheitsorganisation, Theakston, F. (Eds.). **Burden of disease from environmental noise: quantification of healthy life years lost in Europe**. World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen. 2011.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Trends – United Nations Population Division | Department of Economic and Social Affairs**, 2019. Disponível em: <https://www.un.org/en/development/desa/population/theme/trends/index.asp>. Acesso em: 11 mar. 2021.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Plataforma Agenda 2030**, 2015a. Disponível em: <http://www.agenda2030.org.br/sobre/>. Acesso: 11 mar. 2021.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável | As Nações Unidas no Brasil**, 2015b. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso: 11 mar. 2021.

TURNER, K. (Ed.). **Sustainable Environment Economics and Management: Principles and Practice**. London: Belhaven Press, 1993.

PAULI, G. **Blue economy 2.0**: 200 projetos implementati, 4 miliardi di dollari investiti, 3 milioni di nuovi posti di lavoro creati. Edizione Ambiente, 2015.

PEMC – POLÍTICA ESTADUAL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS, 2009. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/pemc/>. Acesso em: 15 mai. 2022.

PERA, Thiago Guilherme. **Efeitos das mudanças tecnológicas e infraestruturais do transporte para o fomento da logística verde da soja brasileira**: abordagens multiobjetivos. 2022. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

PIECYK, M. I.; MCKINNON, A. C. Forecasting the carbon footprint of road freight transport in 2020. **International Journal of Production Economics, Integrating the Global Supply Chain**, 128, p. 31-42, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.08.027>. Acesso em: 15 mai. 2022.

PINHEIRO, Michael; MARUJO, Lino Guimarães. Análise de modelo intermodal para escoamento da produção da soja no centro oeste brasileiro. **Journal of Transport Literature**, v. 6, p. 90-106, 2012.

PINHEIRO, Michael. 2012. **Estimativa da redução das emissões gases de efeito estufa através da intermodalidade no setor sucroenergético**: uma aplicação de programação linear. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) – Universidade de São Paulo, Piracicaba. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.11.2012.tde-31052012-085545>. Acesso em: 07 dez. 2022.

PINTO-VARELA, T.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D.; NOVAIS, A. Q. Bi-objective optimization approach to the design and planning of supply chains: Economic versus environmental performances. **Computers & Chemical Engineering, Energy & Sustainability**, 35, p. 1454-1468, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.03.009>. Acesso em: 28 abr. 2022.

PISHVAEE, Mir Saman; RAZMI, Jafar; TORABI, S. Ali. Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: a new approach. **Fuzzy sets and systems**, v. 206, p. 1-20, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fss.2012.04.010>. Acesso em: 28 dez. 2022.

PNTL – PLANO NACIONAL DE TRANSPORTE E LOGÍSTICA. Plano Nacional Transporte e Logística – Confederação Nacional dos Transportes, 2018.

POKHAREL, S.; MUTHA, A. Perspectives in reverse logistics: a review. **Resources, Conservation and Recycling**, 53, p. 175-182, 2009.

QGIS. **Sistema de Informações Geográficas**, 2020.

RLEC – REVERSE LOGISTIC EXECUTIVE COUNCIL. **What is Reverse Logistics?**. RLEC ed., 2015. Disponível : <http://www.rlec.org/glossary.html>. Acesso em: 20 jan. 2021.

RODRIGUES, P. R. A. **Introdução aos sistemas de transporte no Brasil e à logística internacional**. Edições Aduaneiras, 2008.

ROGERS, Dale S. et al. **Going backwards: reverse logistics trends and practices**. Pittsburgh, PA: Reverse Logistics Executive Council, 1999.

ROTASBRASIL. Distância rodoviária e pedágios atualizados. **Rotas Brasil**, 2021. Disponível em: <https://rotasbrasil.com.br/>. Acesso em: 16 fev. 2022.

SABESP – COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Efeitos de Óleos e Graxas para a tratabilidade de Esgotos e Poluição Difusa**, 2007.

SADEGHEIH, A.; LI, D.; SRIBENJACHOT, S.; DRAKE, P. R. Applying mixed integer programming for green supply chain management. **South African Journal of Industrial Engineering**, 21, p. 13-24, 2010.

SALVARO IMPLEMENTOS, 2020. Disponível em: <http://www.salvaroimplementos.com.br/produtos/4/rodotrem-basculante>. Acesso em: 20 mar. 2022.

STANKEY, 2023. Disponível em: <http://sankey-diagram-generator.acquireprocure.com>. Acesso em: 02 jan. 2023.

SÃO PAULO (Estado). **Hidrovia Tietê-Paraná**, 2004. Disponível em: <http://www.dh.sp.gov.br/hidrovia-tiete-parana/>. Acesso em: 03 jan. 2023.

SCANIA. Heavy Tipper: novo Scania global para mineração. **Scania**, 2020. Disponível em: <https://www.scania.com/br/pt/home.html>. Acesso em: 03 jan. 2023.

SCHRIBER, Thomas J. **An introduction to simulation using GPSS/H**. John Wiley & Sons, Inc., 1991.

SCMIDHEINY, S. **Changing Course: A Global Business Perspective on Development and the Environment**. Cambridge, MA: The MIT Press, 1992.

SHEFFI, Y. **Logistics Clusters: Delivering Value and Driving Growth**. Cambridge, MA: The MIT Press, 2012.

SIDAC – SISTEMA DE INFORMAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DA CONSTRUÇÃO. **Relatório de Coleta de dados – Cerâmica Vermelha**, 2022c. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/>. Acesso em: 16 dez. 2022.

_____. **Relatório de Coleta de dados – Cimento**, 2022a. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/>. Acesso em: 16 dez. 2022.

_____. **Relatório de Coleta de dados – Concreto**, 2022b. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/>. Acesso em: 16 dez. 2022.

_____. **Relatório de Coleta de dados – Transporte e Energia**, 2022d. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/>. Acesso em: 16 dez. 2022.

SILVA, A. S. da; SILVA, F. C. Vale – Apostila do Curso de Mineração – Básico Módulo V: Logística de Transporte de Minérios, 2012.

SIMÃO, Alessandro da Silva. **Modelagem e simulação do transporte de minério de ferro no norte do Brasil em situações de contingência**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

SLAPER, Timothy F. et al. The triple bottom line: What is it and how does it work. **Indiana business review**, v. 86, n. 1, p. 4-8, 2011.

SNIC – SINDICATO NACIONAL DAS INDÚSTRIAS DO CIMENTO. **Localizações**, 2021. Disponível em: <http://snic.org.br/fabricas-localizacoes.php>. Acesso em: 25 fev. 2021.

_____. **Números da Indústria Produção Regional 2019**, 2019b. Disponível em: <http://snic.org.br/>. Acesso em: 25 fev. 2021.

_____. **Perfil da Distribuição do Cimento por regiões e Estados 2019**, 2019c. Disponível em: <http://snic.org.br/>. Acesso em: 25 fev. 2021.

_____. **Roadmap Tecnológico do Cimento**, 2019a. Disponível em: <http://snic.org.br/>. Acesso em: 25 fev. 2021.

SODHI, M. S., Conceptualizing social responsibility in operations via stakeholder resource-based view. **Prod. Oper. Manag.** 24 (9), p. 1375-1389, 2015.

SONCIM, Sérgio Pacífico. **Metodologia para Análise e Seleção de Alternativas de Transporte de Carga em Corredores de exportação: o caso do Transporte dos Mármore e Granitos**. 2002.

SOUTO, Mariana Cerqueira S. M. et al. Análise dos níveis médios de pressão sonora provocada pelos modais de transporte em Taguatinga e Águas Claras-DF. **Revista dos Transportes Públicos-ANTP**, v. 40, p. 2, 2018.

STAHEL, Walter R. Policy for material efficiency—sustainable taxation as a departure from the throwaway society. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 371, n. 1986, 2013.

STAHEL, Walter. **The performance economy**. Springer, 2010. Stahel, W.R., 2010. The Performance Economy. Palgrave Macmillan, Basingstoke, UK.

STOCK, J. R. **Reverse Logistics**, 1992.

STOPFORD, M. **Maritime economics**, 3.ed. Routledge, 2008.

SUBRAMANIAN, N.; GUNASEKARAN, A.; PAPADOPOULOS, T. T.; NIE, P. 4th party logistics service providers and industrial cluster competitiveness: collaborative operational capabilities framework. **Industrial Management & Data Systems**, v. 116, n. 7, p. 303-1330, 2016.

SURYANI, E.; HENDRAWAN, R. A.; MUHANDHIS, I.; PUSPA DEWI, L. Dynamic simulation model of beef supply chain to fulfill national demand. **Jurnal Teknologi**, 78, p. 169-177, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.11113/jt.v78.9609>. Acesso em: 02 fev. 2023.

SUSTAINABLE MOBILITY FOR ALL. **Global mobility report 2017: Tracking sector performance**, 2017.

TANG, C. S. Socially responsible supply chains in emerging markets: some research opportunities. **Journal of Operations Management**, 57, p. 1-10, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jom.2018.01.002>. Acesso em: 01 dez. 2022.

TURNER, R. K.; PEARCE, D. W.. Sustainable economic development: economic and ethical principles. In: Barbier, E.B. (Ed.), **Economics and Ecology: New Frontiers and Sustainable Development**. Springer Netherlands, Dordrecht, p. 177-194, 1993. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-94-011-1518-6_11. 02 fev. 2023.

UIC – INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS. **The railway noise bonus. Discussion paper on the noise annoyance correction factor Final Report**. UIC, 2010.

VALE. **Corredores Logísticos**, 2017. Disponível em: <https://www.vale.com/pt/>. Acesso em: 15 jan. 2023.

VAN BEERS, Dick et al. Industrial symbiosis in the Australian minerals industry: the cases of Kwinana and Gladstone. **Journal of Industrial Ecology**, v. 11, n. 1, p. 55-72, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1162/jiec.2007.1161>. Acesso em: 15 jan. 2023.

VERBETE. **Mineração de ferro em Itabira (MG) deixa passivo socioambiental e econômico**, 2013.

VLI MULTIMODAL. **Informações Portos VLI**, 2021.

WALTHO, C.; ELHEDHLI, S.; GZARA, F. Green supply chain network design: A review focused on policy adoption and emission quantification. **International Journal of Production Economics**, 208, p. 305-318, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.12.003>. Acesso em: 15 nov. 2022.

WANG, G.; GUNASEKARAN, A. Modeling and analysis of sustainable supply chain dynamics. **Annals of Operations Research**, 250, p. 521-536, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10479-015-1860-2>. Acesso em: 15 nov. 2022.

WIJKMAN, A.; SKÅNBERG, K. The Circular Economy and Benefits for Society Swedish Case Study Shows Jobs and Climate as Clear Winners. **World Economic Forum (2014)**. Reorganize and streamline pure materials flows, 2015.

WRAP AND THE CIRCULAR ECONOMY. **Wrap**, 2016. Disponível em: <https://wrap.org.uk/taking-action/climate-change/circular-economy>. Acesso em: 10 fev. 2023.

ZHANG, Dezhi et al. A multimodal logistics service network design with time windows and environmental concerns. **Plos one**, v. 12, n. 9, p. e0185001, 2017.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Sistemas Logísticos de Escoamento de Granéis Sólidos no Brasil

Por ser um país com dimensões continentais e grande exportador de grãos e minérios, produtos do tipo commodity – granel sólido, de baixo valor agregado –, o sistema logístico brasileiro é fundamental para garantir a competitividade desses produtos nos mercados interno e externo, uma vez que representa uma parcela importante do seu custo final. Nesses casos, em razão das características do produto e do mercado, o transporte passa a ter grande relevância na composição do custo do produto (BALLOU, 2010).

Stopford (2008) destaca que o transporte de granéis sólidos possui quatro peculiaridades: elevado volume; necessidade de manuseio e acondicionamento com equipamentos automáticos e especializados; valor da carga relativamente baixo; e boa regularidade do fluxo de comércio, propiciando um dimensionamento mais eficiente dos estoques regulatórios, além de melhor aproveitamento dos equipamentos de movimentação e armazenagem.

Em razão dessas características, as principais opções do sistema logístico para escoamento de granéis no Brasil compreendem os meios de transporte rodoviário, ferroviário e hidroviário, representados na Figura 0-1 e que demonstram suas respectivas infraestruturas (vias de transporte e *hubs*) interconectadas, compondo os corredores do sistema logístico multimodal.



Figura 0-1 – Sistema Logístico Multimodal Brasileiro

Fonte: Adaptado de BRASIL (2021a) e QGIS (2020)

Evolução da matriz de transporte brasileira

Rodrigues (2008) explica a evolução da matriz de transporte a partir das condições geográficas do país, moldada por fatos políticos, econômicos e históricos que acarretaram em demandas e investimentos em infraestrutura dos sistemas de transportes. Segundo pesquisa realizada por Soncim (2002), desde o período colonial, a evolução do transporte de carga passou por seis fases de transformação.

No período compreendido entre o fim da Segunda Guerra Mundial até 1970, a matriz ganhou novas rodovias federais e estaduais de interligações regionais importantes, decorrentes da transferência da capital para Brasília. Além disso, o início da implantação da indústria automobilística nacional e da maior utilização dos derivados de petróleo como combustível, devido à queda no preço do mercado internacional, substituindo a lenha e carvão, ocasionaram o forte crescimento do modo rodoviário (de 38% de participação no atendimento da demanda em tons/km transportada em 1950 para 70%, em 1970), gerando uma forte crise no sistema ferroviário (de 29% para 17% e cabotagem de 33% para 12%).

Esse crescimento do setor rodoviário colaborou para unificar o mercado nacional com a interligação progressiva das economias regionais. A última fase, demonstrada na Figura 0-2, de 1970 até os dias atuais, é marcada por três períodos.

O primeiro, que vai até 1974, compreende o “milagre brasileiro”, quando o aumento na produção e consumo de bens duráveis, com destaque para o setor automotivo, ocasionou o aumento do PIB e do setor de transporte, obtendo crescimento individual de mais de 10%.

O segundo período, de 1974 a 1980, também apresentou crescimento, porém em menor escala, com cerca de 7% e 9%, respectivamente, induzido pela política de substituição de importações de bens de capital e insumos básicos e pela forte crise fiscal que se abateu sobre o Estado, prejudicando o investimento público no setor de infraestrutura de transportes, o que afetou fortemente o desenvolvimento do setor ferroviário e aquaviário nos anos seguintes.

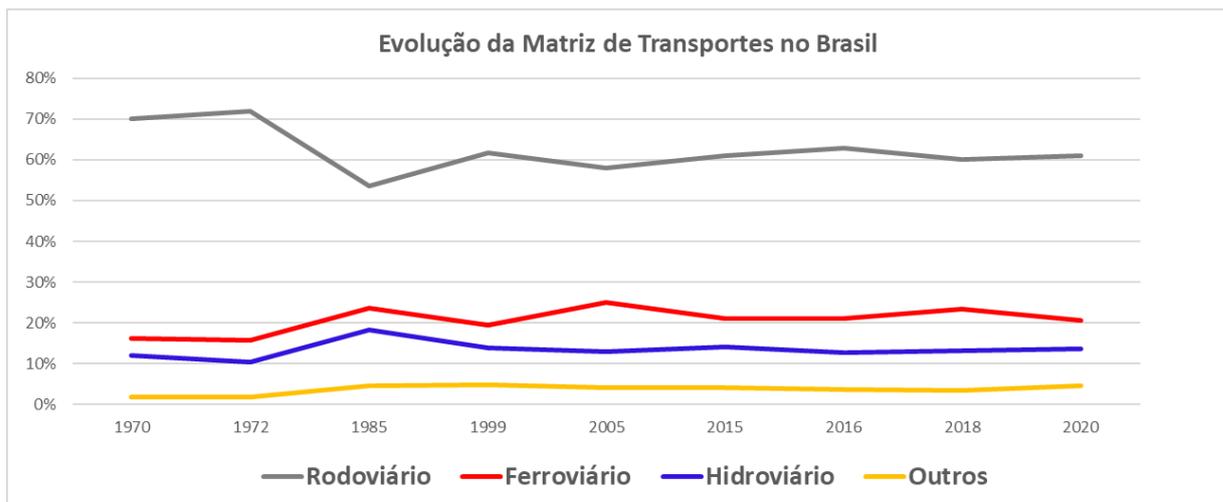


Figura 0-2 – Evolução da Matriz de Transporte no Brasil
Fonte: Confederação Nacional de Transporte (CNT, 2021)

No terceiro período, com início na década de 80, chamada de década perdida em decorrência do agravamento da crise fiscal, cessaram os investimentos em praticamente todos os modos de transporte. Com a democratização na política, a matriz passou por inúmeras modificações em suas políticas governamentais: houve uma série de privatizações no setor de infraestrutura de transportes, programas específicos de aceleração de desenvolvimento e criação de leis e regulamentações para fomentar o desenvolvimento de setores específicos de transporte.

Com a nova Constituição Federal, em 1988, foi extinto o imposto sobre combustíveis e lubrificantes que, por meio do Fundo Rodoviário Nacional (FRN), custeava a expansão e recuperação da malha rodoviária (CNT, 2002). Dessa forma, sem manutenção adequada e novos investimentos, a infraestrutura de transportes ficou comprometida e todos os modos de transporte entraram em crise, enquanto os sistemas ferroviários e aquaviários, gradativamente, iam paralisando suas operações.

Com o intuito de desburocratizar o sistema de transporte, diminuindo o sobrecusto da ineficiência, chamado de “Custo Brasil”, o Governo Federal promulgou uma lei (BRASIL, 1998) para oficializar o conceito de Transporte Multimodal de Cargas regido por um único contrato, utilizado desde a origem até o destino, por meio de um ou mais modos de transportes. Executado sob responsabilidade única do Operador de Transporte Multimodal (OTM), o objetivo foi melhorar a integração dos diferentes modos de transporte e do próprio planejamento de investimentos. No ano de 2001, a Lei nº 10.233 (BRASIL, 2001) instituiu o Conselho Nacional de Integração de Políticas de Transporte (CONIT), a ANTAQ e o DNIT.

Os efeitos da globalização e aumento do comércio entre países em 1993 motivaram a publicação da lei de modernização dos portos (BRASIL, 1993) e, em 1997, o governo brasileiro

sancionou outra lei de regulamentação do transporte aquaviário, definindo os tipos de navegação e incluindo o transporte por cabotagem, que é a navegação entre diferentes portos dentro do território nacional, com a habilidade de utilizar rotas marítimas e fluviais.

Em 1995, a Emenda Constitucional nº 7 estabelecia condições de operação de navios com bandeira estrangeira, abrindo a possibilidade de quebra de monopólio no país, entretanto, em 2003, a ANTAQ retomou a outorga de autorização de cabotagem somente para empresas brasileiras, garantindo a sobrevivência dos estaleiros nacionais.

No ano de 2007, a Lei nº 11.610 (BRASIL, 2007), por meio do Plano Nacional de Desenvolvimento de Dragagem (PND1), foi responsável por garantir investimentos e desenvolvimento das áreas portuárias; o PND2, por sua vez, foi convertido na Lei nº 12.815 (BRASIL, 2013) e integrado ao Programa de Investimentos em Logística (PIL) (BRASIL, 2012).

Em 2009, o Grande Plano de Outorgas estabeleceu a possibilidade de abertura do setor portuário para o setor privado, mas somente no ano de 2013 a ANTAQ definiu quais portos marítimos eram capazes de receber linhas de navios oceânicas (longa distância e cabotagem).

Cria-se, dessa forma, base para a publicação da Lei nº 12.815 (BRASIL, 2013), conhecida como a Lei dos Portos, que regula o processo de concessão de operações portuárias e investimentos privados para expansão e modernização dos portos. Além disso, seleciona e adequa 37 portos públicos organizados em 17 estados, e 143 terminais de uso privado. Dos 37 portos organizados, 34 são marítimos e três, fluviais; 18 são administrados pelos estados ou municípios e o restante, pela Companhia das Docas.

Ficam então redefinidos os papéis das autoridades portuárias, dos operadores e do governo na gestão e regularização do setor. As concessões são encorajadas com a participação de governos de estados, municípios e empresas. Nesse ano, também foram lançados o Plano Nacional de Integração Hidroviário (PNIH), gerido pela ANTAQ (ANTAQ, 2013c), e o Plano Hidroviário Estratégico (PHE), com objetivo de desenvolver o transporte marítimo e fluvial gerido pelo Ministério de Transportes.

Com a promulgação dessas leis, o governo buscou a modernização dos portos brasileiros por meio da redução dos custos logísticos, melhorando a competitividade brasileira, estabelecendo novos critérios de exploração e arrendamento para o setor privado de movimentações de cargas, e definindo regulamentação para instalação de novos terminais portuários privados.

Os planos surtiram efeitos, aliados a algumas facilidades, como o fim da exigência de exclusividade para a movimentação de carga de terceiros e os subsídios gerados para empresas que operam navegação, utilizando um sistema de tributação negativa que recebe recursos públicos para investimentos por meio do Fundo de Renovação da Marinha Mercante (FRMM). Tais fatos conferem maior segurança jurídica aos investidores e atrai investimentos privados, que tiveram um aumento de 38% após o novo marco legal, resultando no crescimento do número de terminais privados e do total de cargas portuárias movimentadas por tipo de produto.

Conforme o Plano Nacional de Logística e Transportes (PNTL, 2018), do total transportado pelo modo aquaviário em 2017, a navegação fluvial representa somente 4% e a cabotagem, 16 %; os produtos tipo granéis sólidos alcançam apenas 14%. Esse baixo número de transporte de cabotagem de minério decorre, principalmente, do fato de que a maioria desse tipo de produto é de minérios e grãos voltados ao atendimento do mercado externo, por meio da navegação de longa distância.

Para garantir a operação portuária durante a pandemia do *Coronavirus Disease* 2019 (COVID-19), o governo brasileiro editou a Medida Provisória nº 945 (BRASIL, 2020), que trouxe adaptações à “Lei dos Portos”, embutindo alguns requisitos de enfrentamento da pandemia e transformando a MP em na nova Lei dos Portos, Lei nº 14.047 (BRASIL, 2020a), que visa trazer mais flexibilidade na gestão dos portos públicos, atrair investimentos, desburocratizar processos (flexibilizando o tempo de arrendamento e implementando a escalação de trabalhadores portuários avulsos por meio eletrônico), incentivar o uso de áreas ociosas e melhorar a competitividade da economia brasileira.

No entanto, ainda existem desafios no transporte aquaviário. Na navegação hidroviária (interior/fluvial) há um grande déficit de competitividade no sistema de transporte relacionado, principalmente, à falta de infraestrutura de *hubs* de integrativos com outros modos de transporte e de armazenagem de carga (CNT, 2002). O Brasil conta com apenas cerca de 120 *hubs* fluviais em operação, enquanto os Estados Unidos da América (EUA) possuem mais de 1100 *hubs*, além de maior eficiência e flexibilidade para operar com uma gama maior de tipos de produtos.

Outro fator vinculado à eficiência do transporte hidroviário fluvial é o tamanho dos comboios (empurrador e barcaça), afetado pelas restrições físicas das hidrovias. No modo de transporte de cabotagem, os principais fatores que acarretam dificuldades são: o desequilíbrio de cargas nos fluxos Sul-Norte (maior) e Norte-Sul (menor); a falta de confiabilidade na entrega de navios estaleiros nacionais, decorrente da situação de penúria dos estaleiros nacionais; e o alto número de trabalhadores necessários para realizar operações portuárias (CNT, 2002).

Recentemente promulgada, a Lei nº 14.301 (BRASIL, 2022a), conhecida como Programa de Estímulo ao Transporte por Cabotagem – BR do Mar, é de fundamental importância para o desenvolvimento da indústria naval do Brasil, pois abre o mercado de cabotagem para navios estrangeiros. De acordo com a Confederação Nacional da Agropecuária (CNA, 2021), devido ao aumento da concorrência, os custos tendem a diminuir e, em alguns casos, a redução pode chegar a 50%, promovendo a alavancagem da cabotagem no Brasil. Para a Universidade de São Paulo (USP, 2021), o crescimento anual do setor pode girar em torno de 30%, atraindo novos investimentos, melhoria de disponibilidade de navios e da confiabilidade do sistema, além de adequações nos portos para atendimento da nova demanda e aprimoramento das produtividades, eficiências e capacidades.

O sistema de transporte ferroviário, por sua vez, também passa por uma expansão e por um cenário geopolítico semelhante ao do sistema hidroviário, com o aumento da participação do setor privado. De 1850 a 1930, o Brasil viveu a expansão ferroviária sustentada pelo escoamento dos produtos agrícolas, como o café, para os mercados externos. Os investimentos públicos e privados eram feitos de forma independente, com bitolas diferentes em trechos específicos, não interligando sistemas ferroviários regionais.

Entre 1930 e 1960, as ferrovias passaram a ser de responsabilidade dos estados. Durante o governo militar, na década de 60, as malhas foram consolidadas em poucas empresas públicas, os ramais ineficientes foram fechados e o foco voltou-se apenas para os projetos estratégicos. Após a década de 70, com o objetivo de substituir as importações, o Brasil passou a investir no desenvolvimento do seu mercado interno. O início da produção nacional de veículos e a possibilidade de uma implantação mais ágil, barata e flexível favoreceram a alta expansão do sistema rodoviário.

A falta dos investimentos no sistema ferroviário, motivada pelo foco conferido pelo governo no modo rodoviário, além da impossibilidade de integração dos fluxos inter-ferroviários para o escoamento de cargas em razão da existência de três diferentes tipos de bitola, fez com que o sistema perdesse credibilidade e parte de seus ativos fosse sucateada pela falta de manutenção e demanda. Na década seguinte teve início seu processo de desestatização e a primeira malha a ser privatizada foi a Rede Ferroviária Federal Sociedade Anônima (RFFSA).

No ano de 1992, o sistema ferroviário ganha força com a Lei das Concessões, Lei nº 8.987 (BRASIL, 1995); já em 1997, o governo outorgou à Companhia Vale do Rio Doce a

exploração da Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM) e da Estrada de Ferro Carajás (EFC). Nos anos seguintes, as demais malhas também foram privatizadas.

A Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), juntamente com o CONIT, ANTAQ e DNIT, foram criados pela Lei nº 10.233, de 5 de junho de 2001 (BRASIL, 2001), com a incumbência de regulamentar e administrar os transportes terrestres em todo território nacional.

O Plano Nacional de Desestatização, relativamente à modalidade ferroviária, tem como principais objetivos: desonerar o Estado; melhorar a alocação de recursos; aumentar a eficiência operacional; fomentar o desenvolvimento do mercado de transportes; e melhorar a qualidade dos serviços. (ANTT, 2021b)

Com as privatizações, o cenário lentamente começou a mudar. Novos investimentos privados foram injetados na recuperação de um sistema abandonado, tanto das vias permanentes quanto do material rodante, e na implantação de novos terminais, soluções de integração de diferentes bitolas e melhoria da integração com sistema rodoviário e aquaviário. Os recursos também foram destinados à capacitação profissional, qualificação das operações, melhoria da gestão sobre as concessões e melhoria da segurança, com a implantação de maiores contornos ferroviários em torno das cidades e a padronização de processos e programas de conscientização. Nesse período de concessão, as ferrovias ganharam eficiência aliada à alta demanda de escoamento de produtos para o mercado externo, chegando a um aumento de mais 160% no transporte em TKU (toneladas por quilometro útil) e uma queda no número de acidentes.

Recentemente, o Programa de Autorizações Ferroviárias – Pro Trilhos (BRASIL, 2021c), criado por meio de uma medida provisória, permite pela livre iniciativa que o setor privado possa construir, operar ferrovias, ramais, pátios e *hubs* ferroviários, conferindo-lhe um novo fôlego para a verticalização da *Supply Chain* e o aumento da malha ferroviária brasileira. Os investimentos previstos para 2022 ultrapassaram R\$ 200 bilhões e estima-se um potencial de mais de 2 milhões de empregos, além da diminuição dos custos de transporte, emissões de CO_2 e modernização da malha atual (BRASIL, 2022b).

A participação do setor rodoviário operado pelo setor privado aumentou, intensificando o desgaste físico da malha rodoviária, o qual não foi devidamente contido com manutenção e novos investimentos necessários para atender à nova demanda crescente, motivada pelo crescimento das exportações do setor agropecuário. A partir dos anos 90, o modal rodoviário, já saturado, apresentava cada vez mais condições precárias, com cerca de 70% da malha pavimentada com condições ruins ou péssimas. Esse fato, segundo o Banco Mundial, elevou os

custos de transporte em, aproximadamente, 50%, tendo em vista a maior necessidade de manutenção dos veículos e de suas frequentes quebras, ocasionando aumento de trânsito, do número de acidentes e emissão de poluentes.

Dessa maneira, em uma tentativa de reverter a situação precária das rodovias e do sistema de transporte, uma série de leis e programas de desenvolvimento foram aprovados. Após a sanção da Lei de Concessões, de 1995, que define as relações e obrigações entre as partes, o Programa Nacional de Concessões (PNC), de 1993, finalmente deslancha, transferindo a responsabilidade de recuperação, manutenção e modernização para o usuário. Reverte-se, assim, o índice sobre as condições das rodovias avaliadas como péssimas, em 2016, para 58%, no entanto, os principais problemas do sistema de transporte prevalecem, como a falta de planejamento integrado, falhas na implementação, na gestão e controle da manutenção.

O Programa de Aumento da Produtividade da Frota Rodoviária no País (Renovar) (BRASIL, 2022), criado em 2022, busca a renovação da frota, a melhoria da produtividade com redução dos custos logísticos, a diminuição das emissões de GEE e PA e a redução do número de acidentes, além do incentivo à economia.

Entretanto, os esforços dos novos programas de melhoria do governo federal junto à iniciativa privada ainda não surtiram efeito. A matriz de transporte brasileira permanece desbalanceada em relação a outros países de mesmo tamanho e natureza. O Brasil, sendo um país exportador de *commodities*, com dimensões continentais, deveria ter maior participação do modo ferroviário e hidroviário, a exemplo de países como Rússia, China, Canadá e EUA. Nota-se também uma ineficiência gerada pelo alto Custo Logístico, representada pelo percentual gasto com o setor de transportes em relação ao PIB; este, por sua vez, é refletido no *ranking* de competitividade sobre qualidade de infraestrutura de transportes.

Essa baixa competitividade geradora do “Custo Brasil” é impactada pela deficiência de uma série de fatores, entre eles, o planejamento integrado dos projetos de sistemas de transporte, o desenvolvimento e execução de projetos (cumprir prazos e escopo acordado), o investimento de recursos em infraestrutura, além da deficiência na questão integridade dos envolvidos nos processos-chave, que possam envolver problemas relacionados à corrupção.

Aliada à questão de eficiência e qualidade, tem-se ainda os fatores ambientais implicados na competitividade dos sistemas de transporte. Em primeiro lugar, no que se refere à quantidade e fonte de energia consumida, que é proporcional à distância percorrida; em

seguida está o consumo de combustível, que varia em função do tipo de transporte utilizado e impacta diretamente sobre a parcela variável do custo de fretes.

Dependendo do modo de transporte envolvido, há um percentual de participação no consumo de distribuição do tipo de combustível utilizado que tem mudado ao longo das últimas décadas com o implemento de novas tecnologias de transporte. No modo de transporte rodoviário (cargas e passageiro), percebe-se uma crescente dependência de combustíveis fósseis, provenientes de fontes não renováveis, como o óleo diesel, diferentemente dos modos ferroviário e hidroviário, que apresentam menor dependência desse tipo de combustível.

Sabe-se que, de acordo com o modo de transporte, tipo de combustível e potência do equipamento de transporte, existem emissões de gases que contribuem para o incremento do efeito estufa, os chamados Gases de Efeito Estufa (GEE) ou ainda *GreenHouse Gases* (GHG), possíveis causadores do aumento da temperatura e consequentes mudanças climáticas, como por exemplo, o aquecimento global. Ademais, muitos desses gases são nocivos à saúde humana, causando inúmeras doenças respiratórias e impactando não apenas o meio ambiente, mas também toda uma sociedade.

Somado a outros impactos ambientais e sociais, o sistema logístico multimodal tem, portanto, fundamental importância para o desenvolvimento sustentável, sendo considerado um tema-chave no Acordo de Paris, no qual o Brasil se comprometeu a adotar medidas de redução de emissão de GHG, por meio da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) (MCTIC, 2017).

APÊNDICE B – Transportes multimodais

Segundo Mesquita (1980), a principal função dos transportes se resume em proporcionar acessibilidade e mobilidade, reduzindo a distância em termos de tempo e espaço entre origem e destino, de mercadorias e pessoas a serem transportadas. Dessa maneira, o transporte e a logística agregam valor de tempo e lugar, conferindo à mercadoria uma vantagem competitiva de poder estar onde e quando desejar, rompendo fronteiras e alcançando novos mercados.

Rodrigues (2008), por sua vez, diferencia os tipos de transporte de acordo com o modo de transporte utilizado ou possíveis conjugações entre eles. O transporte unimodal é a forma mais simples de transporte, quando a unidade de carga é transportada diretamente em um único

modo de transporte, em um único veículo, com apenas um contrato de transporte. Já o transporte intermodal ou sucessivo utiliza veículos diferentes de um ou mais modos de transporte, mas com contratos de diferentes transportadores e, finalmente, o transporte multimodal, conforme a lei do transporte multimodal de cargas (BRASIL, 1998), que cria um único documento – o Conhecimento de Transporte Rodoviário de Carga (CTRC), atualmente Conhecimento de Transporte Eletrônico (CTe) – que acompanha a nota fiscal para ser utilizado em um ou mais tipos de transporte.

O autor também cita que o sistema logístico é constituído pelo modo (via de transporte), pela forma (integração entre os modos), pelo meio (elemento transportador) e pelas instalações complementares (*hubs* / terminais de carga) (RODRIGUES, 2008).

Conforme definição do Grupo Executivo de Integração da Política de Transportes (GEIPOT, 2002), os corredores logísticos são eixos compostos de rotas unimodais e multimodais, que viabilizam o transporte da carga produzida em sua área de influência, desenvolvendo novos negócios por meio de investimentos e da união de mercados produtores aos consumidores, servindo-se de um complexo feixe de facilidades econômicas e sociais.

Sob essa ótica, tem-se que o sistema logístico multimodal sustentável deve considerar, além das atividades logísticas desenvolvidas, o seu impacto com o meio (socioambiental) no qual está inserido. Como caracterizado por Sheffi (2012), os *hubs* logísticos estão associados aos *clusters* logísticos, que são enormes potenciais criadores de empregos, não somente na área de logística, mas em todos os segmentos que se relacionam.

De acordo com proposta apresentada por Subramanian et al. (2016), a clusterização na logística pode ser definida como uma aglomeração de operadores logísticos em determinada região geográfica, que compartilha elementos de interações dinâmicas como infraestrutura social.

Entende-se, então, que os corredores logísticos são formados pela integração estrategicamente coordenada das infraestruturas logísticas dos diversos modos de transporte e respectivos clusters dos *hubs* logísticos que os compõem, de modo que facilitem o fluxo de produtos e serviços entre inter e intrarregiões, criando bases para novas oportunidades de negócios e desenvolvimento socioeconômicos.

Mesquita (1980) e Rodrigues (2008) compartilham da visão de Sheffi (2012) e afirmam que os transportes têm um papel fundamental de fomento para o desenvolvimento socioeconômico de uma região, mas também podem gerar impactos ambientais indesejáveis.

Atividade: transporte ferroviário

O transporte ferroviário é o modo mais utilizado para o escoamento do minério de ferro para os mercados interno e externo, por meio da integração com os portos e navegação de longo percurso. Segundo a Empresa de Planejamento e Logística (EPL, 2021), o minério de ferro totaliza cerca de 75% de toda a carga transportada pelo modo ferroviário ao longo da última década, ou seja, aproximadamente 400 milhões de toneladas por ano, como demonstrado na Figura 0-3.

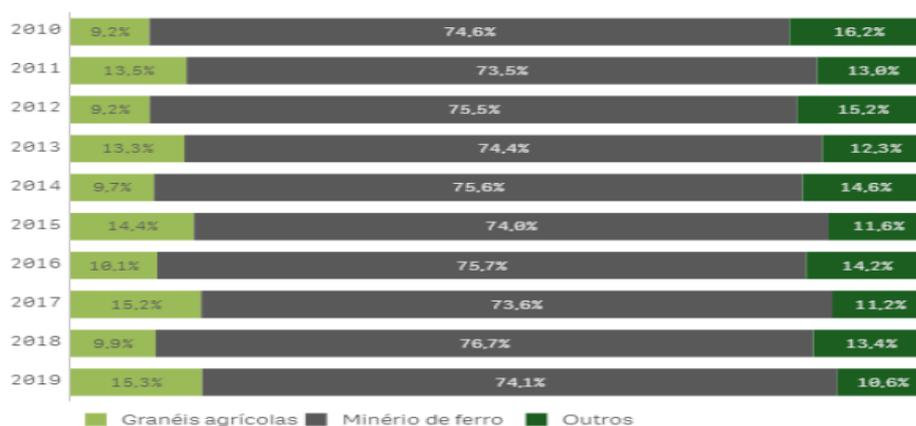


Figura 0-3 – Tipos de Produtos transportados.
Fonte: EPL (2021)

Ainda de acordo com a EPL (2021), o sistema de transporte ferroviário nacional possui uma malha de, aproximadamente, 30.000 km, e conta com 13 empresas concessionadas mapeadas na Figura 0-4, com as respectivas extensões de quilometragem tabeladas. As principais concessões utilizadas nesse estudo do sistema ferroviário sobre supervisão da ANTT foram detalhadas nas Figura 0-5 à Figura 0-9.

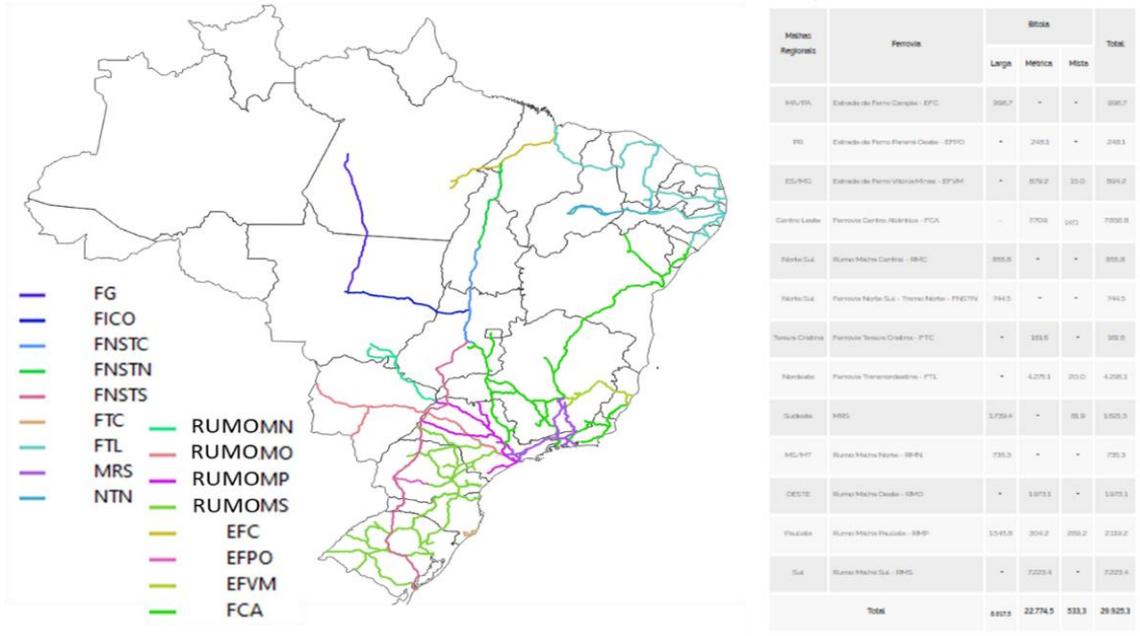


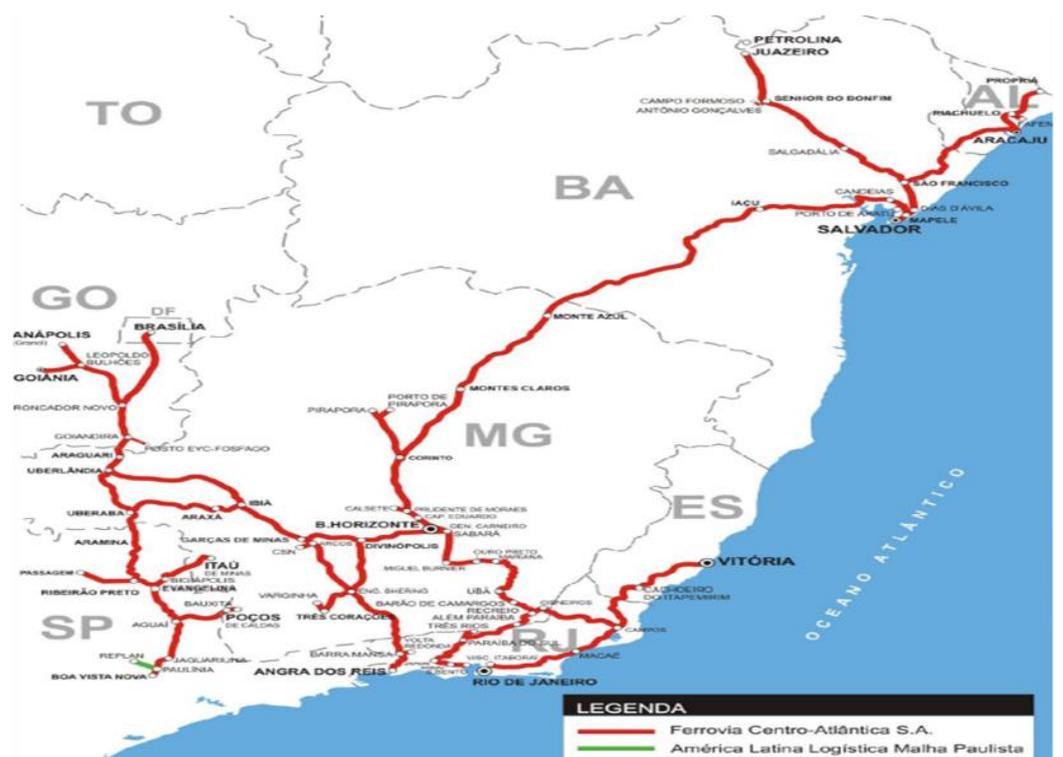
Figura 0-4 – Trechos sob concessão e supervisão da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT)
 Fonte: Adaptado de ANTT (2021a), ANTT (2021b) e QGIS (2020)



Características da Malha Concedida a MRS Logística S.A.

Área de Atuação	Rio de Janeiro (RJ), São Paulo (SP) e Minas Gerais (MG)
Extensão	1.674 km
Bitola	1,00 m / 1,60 m (42 km)
	1,60 m (1.632 km)
Pontos de Interconexão com Ferrovias	Barão de Angra - RJ (FCA – Ferrovia Centro-Atlântica S.A.)
	Barbará - RJ (FCA – Ferrovia Centro-Atlântica S.A.)
	Eng ^o Lafaiete Bandeira - MG (FCA – Ferrovia Centro-Atlântica S.A.)
	Barreiro - MG (FCA – Ferrovia Centro-Atlântica S.A.)
	Miguel Burnier - MG (FCA – Ferrovia Centro-Atlântica S.A.)
	Três Rios - RJ (FCA – Ferrovia Centro-Atlântica S.A.)
	Ouro Branco - MG (EFVM – Estrada de Ferro Vitória a Minas)
	Jundiaí - SP (ALLMP – América Latina Logística Malha Paulista S.A.)
	Lapa - SP (ALLMP – América Latina Logística Malha Paulista S.A.)
	Perequê - SP (ALLMP – América Latina Logística Malha Paulista S.A.)
Pontos de Interconexão com Portos	Km 64 - RJ (Supervia)
	Japerí - RJ (Supervia)
	Rio de Janeiro - RJ
	Sepetiba - RJ
	Santos - SP

Figura 0-6 – Ferrovia MRS e suas interconexões
Fonte: ANTT (2013)



Características da Malha Concedida a Ferrovia Centro-Atlântica S.A.

Área de Atuação	Sergipe (SE) Espírito Santo (SE), Rio de Janeiro (RJ), São Paulo (SP), Minas Gerais (MG), Goiás (GO), Distrito Federal (DF) e Bahia (BA)
Extensão	8.066
Bitola	1,00 m / 1,60 m (169 km) 1,00 m (7.897 km)
Pontos de Interconexão com Ferrovias	Pedro Nolasco - ES (EFVM - Estrada de Ferro Vitória a Minas) Capitão Eduardo - MG (EFVM - Estrada de Ferro Vitória a Minas) Eng ^o Lafaiete Bandeira - MG (EFVM - Estrada de Ferro Vitória a Minas) Pedreira do Rio das Velhas - MG (EFVM - Estrada de Ferro Vitória a Minas) Propriá - SE (TLSA - Transnordestina Logística S.A.) Boa Vista Nova - SP (ALLMP - América Latina Logística Malha Paulista S.A.) Paulínia / Replan - SP (ALLMP - América Latina Logística Malha Paulista S.A.) Barão de Angra - RJ (MRS - MRS Logística S.A.) Bárbará - RJ (MRS - MRS Logística S.A.) Barreiro - RJ (MRS - MRS Logística S.A.) Miguel Burnier - MG (MRS - MRS Logística S.A.) Três Rios - RJ (MRS - MRS Logística S.A.) Eng ^o Lafaiete Bandeira - MG (MRS - MRS Logística S.A.)
Pontos de Interconexão com Portos	Angra dos Reis - RJ Aracaju - SE Aratu - BA Salvador - BA

Figura 0-7 – Ferrovia FCA e suas interconexões
Fonte: ANTT (2013)



Características da Malha Concedida a ALL – Malha Paulista S.A.

Área de Atuação	São Paulo (SP)
Extensão	1.945 km
Bitola	1,60 m (1.463 km)
	1,00 m (243 km)
	1,00 m / 1,60 m (283 km)
Pontos de Interconexão com Ferrovias	Boa Vista Nova - SP (FCA - Ferrovia Centro-Atlântica S.A).
	Replan/Paulinia - SP (FCA - Ferrovia Centro-Atlântica S.A).
	Jundiaí - SP (MRS - MRS Logística S.A).
	Lapa - SP (MRS - MRS Logística S.A).
	Perequê - SP (MRS - MRS Logística S.A).
	Alumínio - SP (ALLMO - América Latina Logística Malha Oeste S.A).
	Mairinque - SP (ALLMO - América Latina Logística Malha Oeste S.A).
	Bauru - SP (ALLMO - América Latina Logística Malha Oeste S.A).
Marco Inicial - SP (ALLMN - América Latina Logística Malha Norte S.A).	
Pontos de Interconexão com Portos	Santos-SP
	Pederneiras - SP
	Panorama - SP

Figura 0-8 – Ferrovia ALL/SP e suas interconexões
Fonte: ANTT (2013)



Características da Malha Concedida a ALL – Malha Sul S.A.

Área de Atuação	Rio Grande do Sul (RS), Santa Catarina (SC), Paraná (PR) e São Paulo (SP)
Extensão	7,265 km
Bitola	1,00 m (7.254 km)
	1,00 m / 1,44 m (11 km)
Pontos de Interconexão com Ferrovias	Rubião Junior - SP (ALLMO - América Latina Logística Malha Oeste S.A).
	Iperó - SP (ALLMO - América Latina Logística Malha Oeste S.A).
	Guarapuava - PR (Ferroeste - Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A).
	Santana do Livramento - RS (AFE - Administración de Ferrocarriles del Estado - Uruguai)
Pontos de Interconexão com Portos	Uruguaiana - RS (Ferrocarril Mesopotamico General Orquiza - Argentina)
	Presidente Epitácio - SP
	Paranaguá - PR
	São Francisco do Sul - SC
	Porto Alegre - RS
Rio Grande - RS	
Estrela - RS (Terminal Hidroviário)	

Figura 0-9 – Ferrovia ALL Sul e suas interconexões

Fonte: ANTT (2013)

Hubs – Terminais de integração multimodais

Os *hubs* da empresa considerada nesse estudo que estão disponíveis no sistema ferroviário nacional, foram demonstrados nas Figura 0-10 à Figura 0-12. Os *hubs* servem para transbordo de coprodutos, ou seja, como ponto de transferência de carga entre modos de transporte. Alguns *hubs* próprios já têm estrutura logística para o transbordo preparadas para o minério de ferro, sendo assim, só precisam de adequação quanto ao novo volume, que será recebido pelos coprodutos, pois tem capacidade limitadas, de acordo com a quantidade e produtividade dos seus equipamentos de carga e descarga. *Hubs* que hoje são focados em grãos, para atender esse caso, precisariam de aluguel de equipamentos adequados para realizar os respectivos trasbordos, tendo assim um maior custo de movimentação e armazenagem em pátio externo quanto necessário, o que poderá acarretar um maior custo operacional.



Figura 0-10 – Hubs de Integração – Ouro Preto e Pirapora (MG)

Fonte: Vale (2017)

Uberaba-MG

Característica: localizado em Uberaba, no Triângulo Mineiro, é parte fundamental do Corredor Centro-Sudeste, uma das principais rotas de escoamento das exportações do agronegócio brasileiro. Atualmente, o terminal é responsável pelo transporte e armazenagem de soja, milho e farelo, que são transportados pela Ferrovia Centro-Atlântica, com destino ao Terminal Integrador Portuário Luiz Antonio Mesquita (Tiplam), em Santos (SP). O Terminal Integrador Uberaba é responsável pela movimentação de açúcar, caracterizando-se como um dos maiores e mais modernos terminais de carga da América Latina.

Principais produtos: soja, farelo, milho e açúcar

Estrutura:

- Pera ferroviária para manobra de trens sem desmembrar a composição
- Um prédio para classificação do produto, 05 balanças rodoviárias, uma balança ferroviária dinâmica e 14 balanças de batelada para grãos e 14 para açúcar
- Armazém com capacidade 120.000 toneladas de grãos e outro com 90.000 toneladas de açúcar
- Silo de 8 mil toneladas de grãos
- Atende um volume de 6,3 milhões de toneladas de milhos e soja por ano; e 2,4 milhões de toneladas de açúcar



Palmeirante - TO

Característica: localizado em Palmeirante (TO), é responsável por viabilizar o escoamento da produção de soja e milho da nova fronteira agrícola e das principais áreas de produção agrícola do país pelo Porto de Itaqui (MA), utilizando a Ferrovia Norte Sul.

Principais produtos: Soja e milho

Estrutura:

- Armazém com capacidade 90.000 toneladas
- 4 tombadores
- Atenderá um volume de 3,4 milhões de toneladas de grãos por ano
- Descarga de 40 caminhões por hora
- Carregamento de um trem de 80 vagões é realizado em 4,5 horas.



Araguari-MG

Característica: Localizado em Araguari (MG), é um dos maiores terminais de transbordo de grãos e fertilizantes da América Latina. O TI Araguari faz parte do Corredor Centro-Leste da VLI e compõe a principal alternativa logística integrada, responsável pela captação de cargas das principais fronteiras agrícolas do país, e por dar suporte ao escoamento do agronegócio pelo Complexo de Tubarão, no Espírito Santo.

Principais Produtos: Soja, farelo, milho e fertilizantes

- **Estrutura:**
- 1 armazém de grãos com capacidade estática de 120 mil toneladas
- 1 silo pulmão de grãos com capacidade estática de 6 mil toneladas
- 1 armazém de fertilizantes com capacidade estática de 44 mil toneladas
- Sistema de alta performance em modelo de pera para carregamento e descarga ferroviária
- Realiza carregamento ferroviário de grãos, descarga rodoviária de grãos, descarga ferroviária de fertilizantes e carregamento rodoviário de fertilizantes.



Figura 0-11 – Hubs de Integração Vale – Uberaba, Araguari (MG) e Palmeirante (TO)
Fonte: Vale (2017)

Santa Luzia-MG



Características: Localizado em Santa Luzia (MG), opera como um centro avançado de clientes siderúrgicos para distribuição de cargas na grande BH, interior de Minas Gerais, São Paulo e região Sul do Brasil. O TI Santa Luzia é responsável, também, pela movimentação de minério de ferro destinado ao abastecimento de usinas siderúrgicas. Possui capacidade para movimentar 120 mil toneladas mensais de produtos siderúrgicos acabados e 200 mil toneladas mensais de minério de ferro.

Principais Produtos: Produtos siderúrgicos acabados (bobinas, fardos, chapas e placas de aço, fio máquina) e minério de ferro.

Estrutura:

- 1 galpão de siderúrgicos com capacidade estática de 30 mil toneladas
- 1 pátio de siderúrgicos com capacidade estática de 30 mil toneladas
- 1 pátio de granéis com capacidade estática de 60 mil toneladas
- Equipamentos de movimentação de produtos siderúrgicos como pontes rolantes e acessórios.
- Sistema de alta performance em modelo de pera para carregamento de minério.

Guará-SP



Características: Localizado no interior de São Paulo, próximo à cidade de Ribeirão Preto, o Terminal Integrador Guará é o primeiro especializado em cargas de açúcar na VLI. Com sistema para transbordo, transporte e armazenagem, o terminal tem capacidade para movimentar 2,3 milhões de toneladas do produto por ano. O Terminal Integrador Guará interliga as regiões produtoras de açúcar para viabilizar sua exportação via Porto de Santos e também pelo Tiplam – Terminal Integrador Portuário Luiz Antonio Mesquita (TIPLAM), que foi ampliado para movimentar seis vezes mais cargas, atendendo as operações do corredor Centro-Sudeste voltadas à exportação. Com um sistema integrado que conta com tecnologia de ponta, o carregamento de trens com até 90 vagões pode ser feito em, aproximadamente, 07 horas, representando muito mais agilidade no escoamento do açúcar para exportação.

Principal produto: açúcar

Porto Nacional - TO



Estrutura:

- Armazém com capacidade 60.000 toneladas
- 3 tombadores
- Atenderá um volume de 2,6 milhões de toneladas de grãos por ano
- Descarga de 40 caminhões por hora
- Carregamento de um trem de 80 vagões é realizado em 4,5 horas.

Característica: localizado em Porto Nacional, próximo à capital do Tocantins, é responsável por viabilizar o escoamento da produção de soja e milho da nova fronteira agrícola e das principais áreas de produção agrícola do país pelo Porto de Itaqui (MA), utilizando a Ferrovia Norte Sul.

Principais Produtos: Soja e milho

Figura 0-12 – Hubs de Integração Vale – Santa Luzia (MG), Guará (SP) e Porto Nacional (TO)
Fonte: Vale (2017)

Equipamentos de carregamento e descarregamento

Para a integração entre os modos de transporte nos terminais multimodais ou nos *hubs* logísticos são necessários equipamentos de transbordo, ou seja, de carga e descarga, como por exemplo, pás-carregadeiras, correias transportadoras e tombadores de vagões, representados na Figura 0-13.



Figura 0-13 – Exemplos de equipamentos de carga/descarga e armazenamento
Fonte: Vale (2017) e Silva e Silva (2012)

Equipamentos rodantes – trens e vagões

O sistema de transportes ferroviário em estudo tem disponíveis veículos de carga, os trens, formados pela composição de duas locomotivas que tracionam até cerca de 84 vagões, HFE ou GDD, representados pela Figura 0-14, com suas respectivas capacidades de carga de 73 t e 66 t, totalizando cerca de 6.000 t úteis em cada composição férrea, no caso da Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM).

A capacidade de transporte varia de acordo com o número de locomotivas, tipos de vagões e restrições geográficas de cada ferrovia, conforme explicitado nas subseções 4.2.1.1 e na Figura 4-15 – Fórmula de Colson: capacidade instalada Figura 4-15.

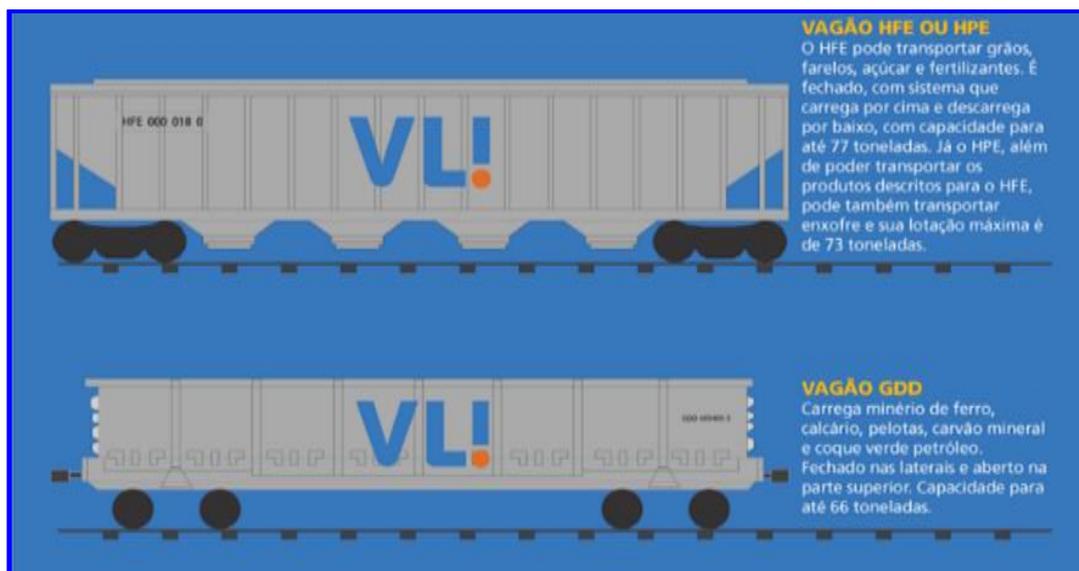


Figura 0-14 – Exemplos de vagões a serem considerados no estudo
Fonte: Vale (2017)

Atividade: transporte por cabotagem

Com uma costa de mais de 7.000 km, existem cerca de 40 *hubs* portuários públicos e 160 Terminais de Uso Privado (TUP) disponíveis para cabotagem, sendo que nem todos os *hubs* estão preparados com equipamentos específicos de carga e descarga para movimentar produtos tipo granéis sólidos minerais.

De acordo com a infraestrutura logística disponível, Silva e Silva (2012) indicam que os portos de carregamento de navio para o escoamento do minério a serem compartilhados com o escoamento do coproduto no mercado interno, por meio da cabotagem, devem ser supridos pelo abastecimento das respectivas ferrovias, a partir dos portos de Tubarão e Itaguaí (Figura 0-15), mas como o produto prioritário a ser operado no porto de Tubarão é o minério de ferro, sua a capacidade ociosa é restrita, há necessidade de um porto de apoio, o de Aracruz (ES).

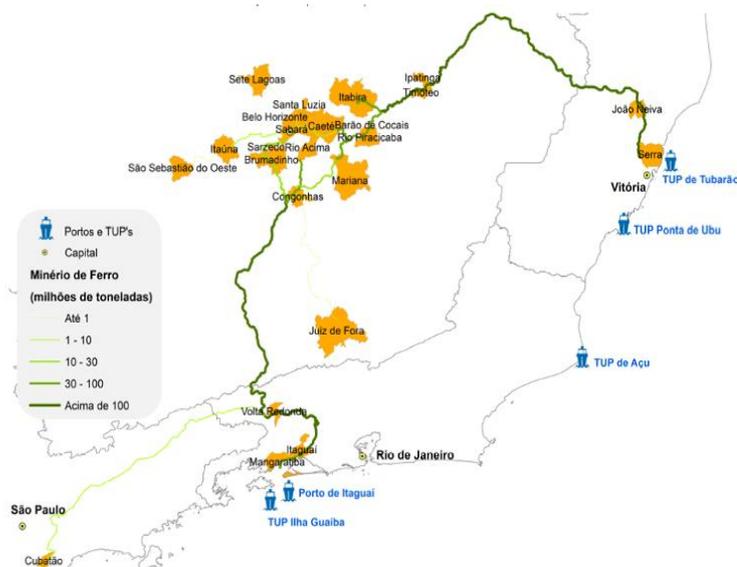


Figura 0-15 – Rotas multimodais para escoamento de minério de ferro através de cabotagem, a partir dos portos de Tubarão, Ilha Guaíba e Itaguaí
Fonte: Brasil (2018b)

Os principais *Hubs* portuários para cabotagem (descarga) estão mapeados na Figura 0-16. Além dos portos organizados, o sistema de transporte de aquaviário de cabotagem também é composto por *hubs* portuários, nos TUPs detalhados na Figura 0-17 a Figura 0-23.



Figura 0-16 – *Hubs* portuários aptos para cabotagem de granéis sólidos
Fonte: Adaptado de Brasil (2021a) e QGIS (2020)

Localização

Localizado na costa norte da Baía de Sepetiba, no município de Itaguaí, estado do Rio de Janeiro

Endereço: Estrada Prefeito Wilson Pedro Francisco, s/n - Itaguaí - RJ - CEP 23825-410

Coordenadas: Lat. 22° 55' 43" S Long. 43° 49' 55" O

Contato

Telefone: (21) 3782- 3185

E-mail: asscomcdrj@portosrio.gov.br

Página Web: <http://www.portosrio.gov.br/>

CNPJ: 42.266.890/0001-28



Foto: Ministério dos Transportes

Figura 0-17 – Hub Portuário Terceirizado (Carga) – Itaguaí/RJ. Fonte: ANTAQ, (2021).

Localização

O Porto Organizado de Barra do Riacho está localizado no distrito de Barra do Riacho, pertencente ao município de Aracruz no estado do Espírito Santo (ES), a cerca de 30 milhas náuticas (55 km) ao norte de Vitória.

Endereço: Avenida Getúlio Vargas, 556, Vitória (ES)

Coordenadas: Lat. 19° 50' 15" S Long. 40° 1' 60" O

Contato

Telefone: (27) 3132-7360

E-mail: dirpre@codesa.gov.br

Página Web: <http://www.codesa.gov.br/site/>

CNPJ: 27.316.538/0001-66



Foto: Mário Bock

Figura 0-18 – Hub portuário terceirizado – Aracruz (ES)
Fonte: ANTAQ (2021)

Geral

Status: Em operação

Empresa(s) Autorizada(s):

- Vale S.A., CNPJ: 33.592.510/0001-54

Ano de início das operações do terminal: 1966

Localização

Endereço: Avenida Dante Michelini - S. 500 - Jardim Camburi - Vitória/ES

Coordenadas: Lat. 20°17'17" S Long. 40°14'56" O

Contato

Telefone: (27) 3333-3679

E-mail: regulatorio.portos@vale.com

Página Web: <http://www.vale.com/brasil/PT/business/operaticoes/portos/terminais/Paginas/default.aspx>

Estrutura de acostagem

Tipo: Pier e Cais

Número de berços: 7

Principais Produtos Movimentados: Minério de ferro, fertilizantes, milho, soja e combustíveis

Armazenagem

Capacidade total:

- 4061500 t
- 58200 m³

Equipamento de Cais

Capacidade total:

- Grânéis sólidos: 73.100 t/h

Movimentação do terminal

Capacidade total:

- Grânéis sólidos: 73.100 t/h

Porto de Tubarão

O terminal de Tubarão tem dois píeres com três berços de atracação. No pier de número um, existem dois berços: um do lado sul e outro do lado norte. Já no pier de número dois há apenas um berço de atracação (veja na foto).



Navio Vale Rio de Janeiro, atracando em Tubarão

O Porto recebe principalmente minérios das minas dos Complexos de Mariana e de Itabira, totalizando nove unidades. Vamos conhecer as principais prescrições de Tubarão:

Porto de Tubarão - TU		
Berço	Calado	DWT Máximo
Pier 1 Sul	15,5m + maré	170 kt
Pier 2 Norte	17m + maré	200 kt
Pier 2	20m + maré	365 kt
Capacidade de estocagem: 4,5 milhões de toneladas		

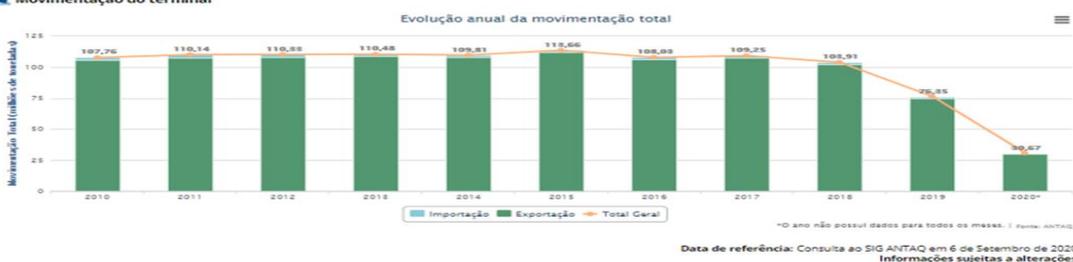


Figura 0-19 – Hub portuário de Tubarão
Fonte: Adaptado de Silva e Silva (2012) e ANTAQ (2021)

O Terminal Integrador Portuário Luiz Antonio Mesquita (TIPLAM) é um importante ativo da VLI e está localizado em Santos, região litorânea de São Paulo. Em funcionamento desde 1969, tem capacidade para movimentar 14,5 milhões de toneladas de produtos por ano, sendo 5 milhões de grãos, 4,5 milhões de açúcar e 5 milhões de fertilizantes.



O embarque de cargas realizado pelo TIPLAM é o desfecho de uma cadeia logística de alta performance criada pela VLI no Corredor Centro-Sudeste, uma rota de alta relevância para o escoamento de granéis agrícolas. Os terminais integradores de Guará (açúcar) e Uberaba (grãos e açúcar) recebem e encaminham para o TIPLAM, através da Ferrovia Centro-Atlântica, a safra das principais regiões produtoras do país como Mato Grosso, Goiás, São Paulo e Minas Gerais.

O TIPLAM conta com uma grande infraestrutura para armazenagem de produtos, carregamento e descarga de trens e navios. Uma das vantagens do TIPLAM é a sua operação de exportação ser realizada 100% pela ferrovia, proporcionando maior rapidez tanto na entrada como na saída ao terminal, eliminando gargalos.

O TIPLAM tem outros grandes diferenciais, como o fato de estar localizado na área continental de Santos, no Canal de Piaçaguera, afastado da zona urbana da cidade, o que possibilita alcançar altas performances operacionais sem provocar impactos à comunidade.

Detalhes do porto

Berço 1 – descarga

- DWT máxima: 67.100mt
- LOA máximo: 200m
- BEAM máximo: 33,0m
- Profundidade: 9,8m
- Calado operacional no berço: 9,8 m
- Calado máximo no canal: 13,2m com uma maré de 1,1m
- Calado máximo na bacia de evolução: 9,8m com uma maré de 1,1m
- Dimensões mínimas das escotilhas: 12m x 8 m
- Posições dos guindastes: Não no lado de bombordo
- Taxa máxima de descarga: 1200 t / h
- Altura máxima do convés até o topo da tampa da escotilha (m): 2,8 m

Berços 2 e 3 – carregamento

- Projetado para operar com açúcar, soja, farelo de soja e milho.
- DWT máxima: 90.000mt
- LOA máximo: 230m
- BEAM máximo: 37 m
- Profundidade: 13,5m
- Calado operacional no berço: 13,2 m
- Calado máximo no canal: 13,2m com uma maré de 1,1m
- Calado máximo na bacia de evolução: 9,8m com uma maré de 1,1m
- Calado aéreo: 19,39 m
- Posições dos guindastes: Não no lado de bombordo
- Taxa máxima de carregamento: 3000 t / h
- Peso oficial RF – Balança de terra
- Altura máxima do convés até o topo da tampa da escotilha (m): 2,8 m

Berço 4 – descarga

- DWT máxima: 90.000mt
- LOA máximo: 230m
- BEAM máximo: 32,6m
- Profundidade: 13m
- Calado operacional no berço: 12,0m
- Calado máximo no canal: 13,2m com uma maré de 1,1m
- Calado máximo na bacia de evolução: 9,8m com uma maré de 1,1m
- Calado aéreo: 19,39 m
- Dimensões mínimas das escotilhas: 12m x 8 m
- Posições dos guindastes: Não no lado de bombordo
- Taxa máxima de descarga: 1200 t / h
- Altura máxima do convés até o topo da tampa da escotilha (m): 2,8 m

Figura 0-20 – Terminal Integrador Portuário Luiz Antônio Mesquita (TIPLAM)
Fonte: VLI (2021)



Característica: Localizado em Barra dos Coqueiros (SE), próximo a Aracaju, é o único terminal portuário em Sergipe. O Terminal Marítimo Inácio Barbosa (TMIB) movimentam granéis sólidos, granéis líquidos, grãos e operação *offshore* (suporte para as embarcações de apoio as plataformas de petróleo próximas à costa).

Principais produtos: Coque, ureia, cimento, clínquer, trigo, soja, fertilizantes, ácido sulfúrico e derivados.

Estrutura:

- 1 píer de atracação para granéis com 356 metros de comprimento
- 1 píer de atracação para operação *offshore* com 59 metros de comprimento
- 7 armazéns com capacidade estática de 55 mil toneladas
- 2 pátios de granéis com capacidade estática de 90 mil toneladas
- 3 silos de granéis com capacidade estática de 60 mil toneladas

Operação Rodoviária: Descarga e carregamento de granéis, carregamento de ácido sulfúrico e descarga de grãos.

Figura 0-21 – Terminal Marítimo Inácio Barbosa (TMIB)
Fonte: VLI (2021)



Característica: localizado na capital maranhense, o Terminal Portuário São Luís (TP São Luís) é operacionalizado no Porto de Itaqui e possui vantagem competitiva devido à sua localização estratégica, próxima da rota com a Europa e os Estados Unidos.

Principais Produtos: soja, milho, gusa e minério de manganês.

Estrutura:

- 1 píer de atracação com 280 metros de comprimento e profundidade de 18 metros
- 5 silos e 2 armazéns de estocagem de grãos com capacidade estática de 220 mil toneladas
- 3 pátios de ferro gusa com capacidade estática de 140 mil toneladas
- Descarga ferroviária de grãos e ferro gusa.

Figura 0-22 – Terminal Portuário São Luís (TPSL)
Fonte: VLI (2021)



Estrutura:

- Pier de atracação de 350m de comprimento e 45m de largura;
- 2 berços de atracação, sendo um de 14,6 m de profundidade e outro de 15,5 m de profundidade;
- Movimentação anual estimada em 10 MMt, sendo 4,2 MMt de minério e 4,8 MMt de carvão;
- Dois descarregadores contínuo de navio com capacidade de 2400t/h cada;
- Dois guindastes portuários sobre rodas com capacidade para 1200t/h;
- Dois sistemas de correias transportadoras do tipo tubular com 8,6mil metros de extensão e capacidade para 2400t/h cada.

Principais produtos:

Carvão, minério e pelotas.

Figura 0-23 – Hub portuário Pecém
Fonte: VLI (2021)

Atualmente, o subsistema de transporte de granéis por cabotagem utiliza os tipos de navios ilustrados pela Figura 0-24.



Handsize: navios com DWT (*dead weight*) com até 40 mil toneladas. O DWT é quanto o navio tem capacidade de levar, além dos equipamentos que já fazem parte dele.



Panamax: navios com DWT com até 75 mil toneladas.



Capesize: navios com DWT com até 200 mil toneladas.



VLOC (*Very Large Ore Carrier*): navios com DWT entre 200 e 300 mil toneladas.



ILOC (*Ultra Large Ore Carrier*): navios com DWT entre 300 e 400 mil toneladas.

Figura 0-24 – Tipos de navios - Cabotagem.
Fonte: Silva e Silva (2012)

Atividade: transporte utilizando hidrovias

O Brasil possui cerca 22.000 km de rios navegáveis, mas nem todas as bacias hidrográficas estão no fluxo logístico do coproduto deste estudo. O estado de Minas Gerais está situado em uma região central do país e do mercado, a região Sudeste, que é dotada de hidrovias que permitem uma conectividade com outros importantes centros consumidores, como o Sul e

Nordeste. Devido às suas características geográficas, abriga nascentes de importantes rios das regiões hidrográficas, que estão representadas na Figura 0-25.

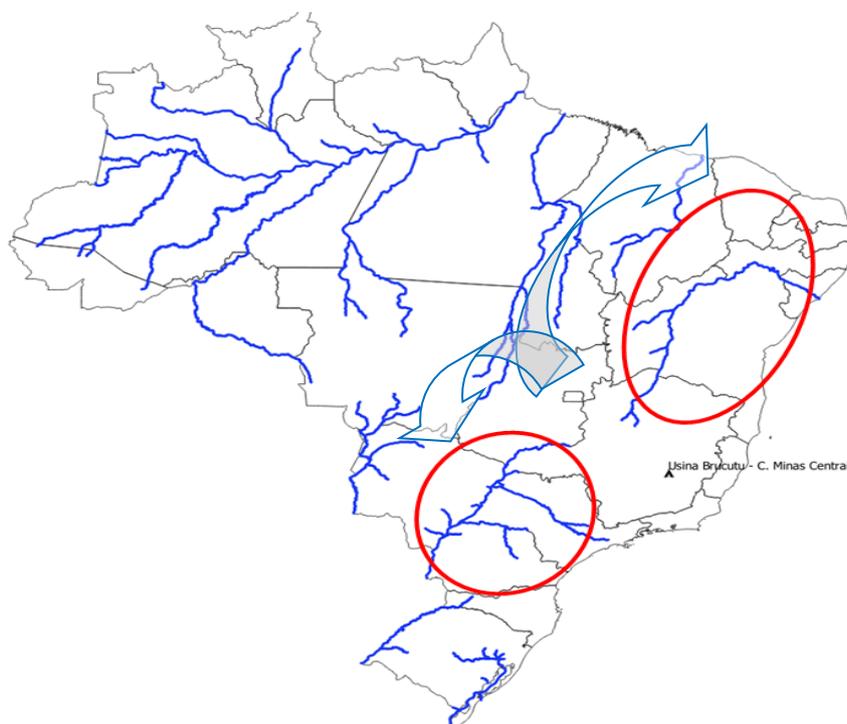


Figura 0-25 – Áreas de influência das hidrovias
Fonte: Adaptado de Brasil (2021a) e QGIS (2020)

A bacia do Rio São Francisco, que conecta o mercado da região Nordeste e a hidrovia Paraná/Tietê com a região Oeste de São Paulo e Paraná é ilustrada com maiores detalhes na próxima subseção.

Hidrovia São Francisco

A hidrovia do São Francisco ocupa destaque no transporte hidroviário nacional, sendo a mais importante do Estado de Minas Gerais. A hidrovia é constituída pelo Rio São Francisco e afluentes, Rio Grande e Corrente, com o maior trecho compreendido entre Pirapora (MG) e Juazeiro (BA)/Petrolina (PE). São 1.370 km com um calado de 1,5 m a 2 m, variando de acordo com a época do ano.

Na barragem de Sobradinho a montante, localizada cerca de 40 km de Juazeiro, a transposição é feita por eclusa em razão dos pedrais existentes. Há uma limitação no calado do leito, restringindo o limite de carga nesse trecho dos comboios a 2.000 tons.

A navegação ainda não é viável para a navegação comercial de granéis sólidos minerais no trecho entre Petrolina e Foz, conforme se observa na Figura 0-26.

três pás carregadeiras, um *grab* eletro-hidráulico e quatro módulos de correia transportadora. (ANTAQ, 2013a, p. 55)

Hubs portuários fluviais (descarga)

Os portos de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA) podem ser acessados pela Ferrovia Centro-Atlântica (FCA), mapeada na Figura 0-28 e pelas rodovias BR-428, BR-407 e BR-324, que os conectam aos principais centros consumidores da Região Nordeste, em um raio de até 1.000 km de distância (ANTAQ, 2013a). Já o porto de Ibotirama tem acesso ao interior da Bahia pela BA-190.



Figura 0-28 – Hidrovia do Rio São Francisco
Fonte: Adaptado de Brasil (2021b) e QGIS (2020)

Hidrovia Paraná-Tietê

Com cerca de 1.600 km navegáveis, conforme pode ser observado na Figura 0-29, o rio Paraná se estende da hidrelétrica de Itaipu, no Paraná, até a hidrelétrica de Água Vermelha, em Minas Gerais, e a hidrelétrica de São Simão, no Sul de Goiás. O trecho navegável do rio Tietê possui 800 km de extensão, de São Pedro a Jupia, onde encontra com o rio Paraná.



Figura 0-29 – Bacia do Rio Paraná-Tietê

Fonte: Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2009)

A hidrovía Paraná-Tietê faz parte de um sistema intermodal por sua interligação com rodovias e ferrovias, sendo estrategicamente privilegiada. Sua área de abrangência está inserida em uma macrorregião compreendida entre os estados de Goiás, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Mato Grosso do Sul; com uma economia diversificada, responsável por mais de 50% do PIB nacional, está em franco crescimento e possui grande potencial consumidor de materiais de construção.

A capacidade de transporte dos comboios depende das dimensões das eclusas do rio Tietê que, segundo a ANTAQ (2013b), têm 142 m de comprimento, 12 m de largura e 3 m de calado; com relação ao rio Paraná, as medidas são de 210 m, 17 m e 3,5 m, respectivamente. Outras restrições são as pontes rodoferroviárias que interferem no número de chatas e afetam a produtividade total do sistema de navegação fluvial.

Hubs portuários fluviais da hidrovía Tietê-Paraná (carga)

O *hub* portuário fluvial mais próximo do sistema ferroviário do estado de Minas Gerais é o Porto Público de São Simão (GO), que se conecta com o sistema ferroviário a partir de Brucutu pela EFMV e segue na direção Oeste até Santa Luzia/Capitão Eduardo, onde faz conexão com o corredor FCA-Oeste e se estende até o *hub* de General Curado que, por sua vez, se conecta à FNS-TS e chega, finalmente, a São Simão.

Hubs portuários fluviais da hidrovia Tietê-Paraná (descarga)

Os hubs portuários fluviais de descarga estão localizados no mapa apresentado pela Figura 0-30.

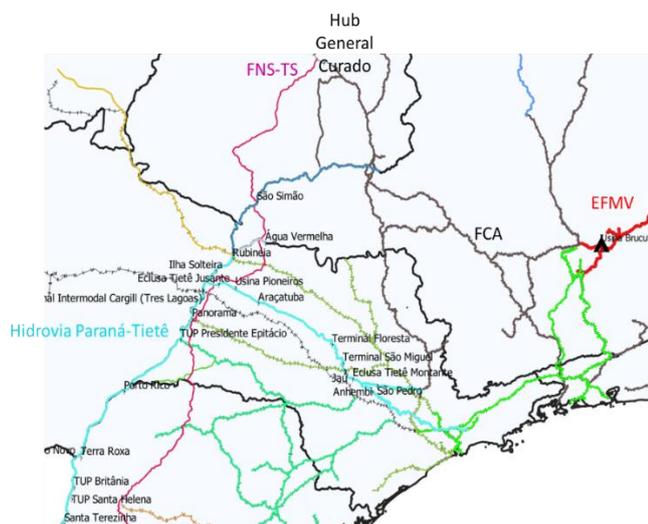


Figura 0-30 – Portos disponíveis – Hidrovia Rio Paraná-Tietê
Fonte: Adaptado de Brasil (2021b) e QGIS (2020)

Tipos de comboios e barcaças

Para o subsistema hidroviário fluvial são indicados os modelos de comboio ilustrados pela Figura 0-31 e Figura 0-32. De acordo com a ANTAQ (2009), a capacidade total de carga considerada para esse tipo de embarcação, composta por barcaças (chatas) e um empurrador, é de 3.000 t na hidrovia São Francisco e de 6.000 t na hidrovia Tietê-Paraná.

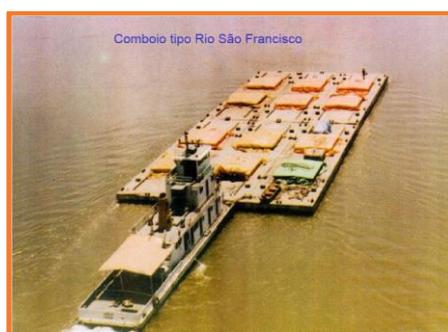


Figura 0-31 – Barcaças tipo rio São Francisco
Fonte: Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2009)

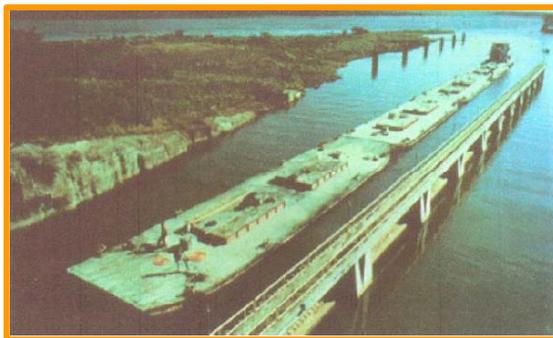


Figura 0-32 – Barcaças tipo rio Tiete-Paraná
Fonte: São Paulo (2004)

Atividade: transporte rodoviário

Conforme pesquisa da Confederação Nacional de Transporte (CNT, 2021), o Sistema Nacional de Viação (SNV), representado pela Figura 0-33, é composto pela integração da malha federal e trechos estaduais considerados estratégicos para movimentação de carga. No total, possui cerca de 1.720.700 km de extensão, dos quais somente 12% são pavimentados.

Segundo o Ministério de Infraestrutura, o país possui, atualmente, cerca de 76.000 km de estradas, das quais 86% estão pavimentadas (BRASIL, 2018b). Em sua maioria, a malha federal é administrada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), que tem como objetivo “[...] implementar a política de infraestrutura do Sistema Federal de Viação, compreendendo sua operação, manutenção, restauração ou reposição, adequação de capacidade e ampliação, mediante construção de novas vias, dentre outras atribuições”.

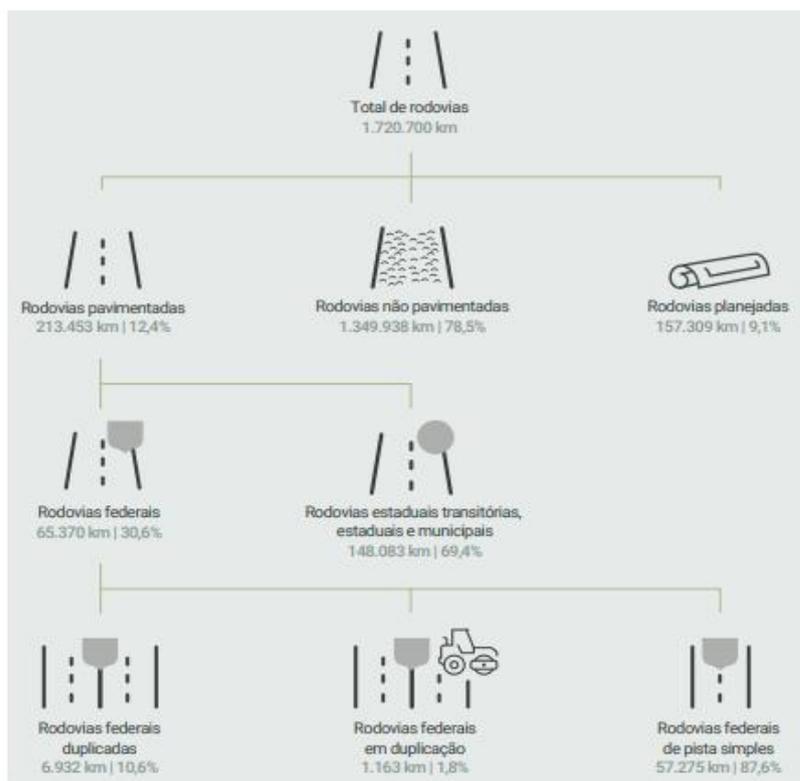


Figura 0-33 – Sistema Nacional de Viação
 Fonte: Confederação Nacional de Transporte (CNT, 2021)

A parte da malha não administrada pelo DNIT, cerca de 13%, é gerida por meio de concessões reguladas pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), também vinculada ao Ministério.

A Agência Reguladora tem por finalidade regular, supervisionar e fiscalizar as atividades de prestação de serviços e de exploração da infraestrutura de transportes, exercidas por terceiros, visando garantir a movimentação de pessoas e bens, harmonizar os interesses dos usuários com os das empresas concessionárias, permissionárias, autorizadas e arrendatárias, e de entidades delegadas, preservar o interesse público, arbitrar conflitos de interesses e impedir situações que configurem competição imperfeita ou infração contra a ordem econômica. (BRASIL, 2001a)

A ANTT ainda é responsável pela gestão dos impactos socioambientais, como o número de acidentes, emissões e resíduos. Em 2018, a agência administrava cerca de 20 concessões de rodovias, totalizando, aproximadamente, 10.000 km, conforme pode ser observado no mapa da Figura 0-34; para os anos seguintes, de acordo com a CNT (2021), a previsão de concessões sobre rodovias pavimentadas ultrapassará os 22.000 km, aumentando também os investimentos e número de vias com pedágios.

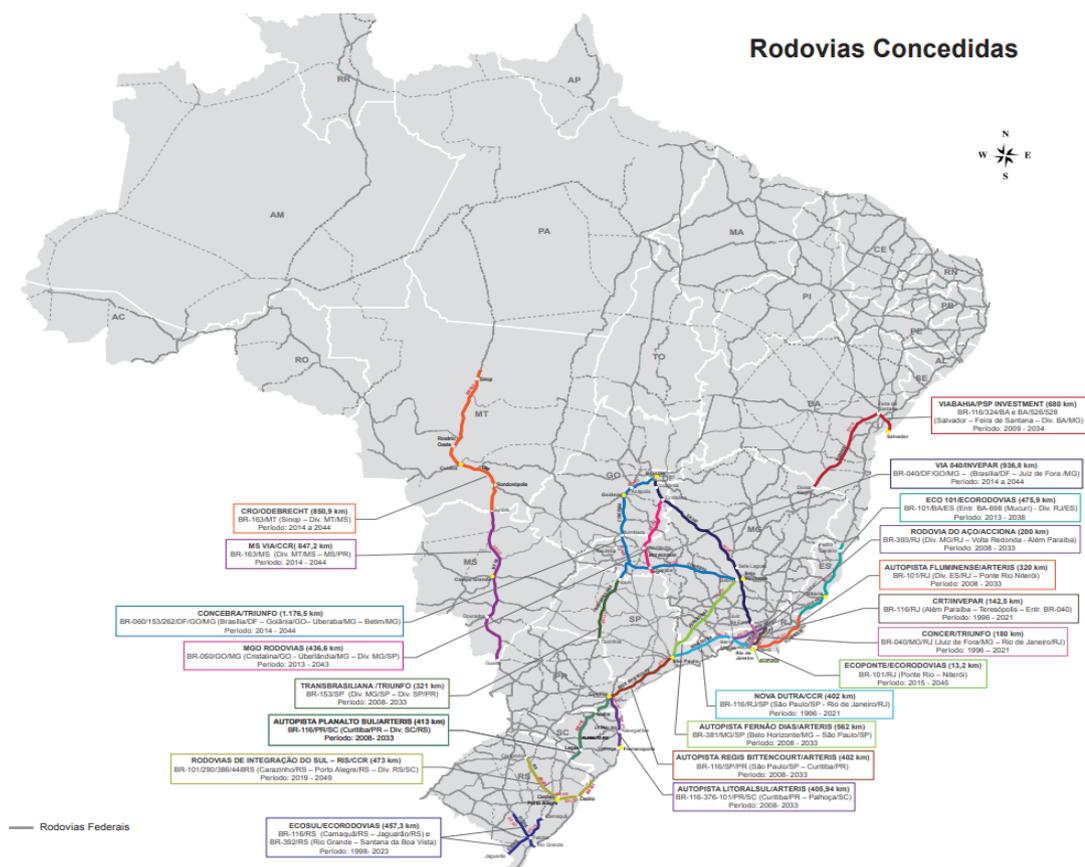


Figura 0-34 – Trechos sobre concessão e supervisão da ANTT
Fonte: Brasil (2018b)

Para exploração das concessões, as concessionárias utilizam o pedágio como forma de arrecadação, comprometendo-se com investimentos contínuos na manutenção e na adequação da capacidade das vias, com o objetivo de minimizar os impactos socioambientais. Segundo pesquisa da CNT (2021), os trechos concedidos têm apresentado melhoria contínua nos resultados na avaliação da Pesquisa CNT de Rodovias, comprovando a efetividade da continuidade dos investimentos.

De acordo com a capacidade e número de eixos, os diferentes tipos de veículos do modo rodoviário disponíveis no mercado nacional para o transporte do coproduto ao seu mercado consumidor estão representados na Figura 0-35.



Figura 0-35 – Veículos de transporte de granéis sólidos (minerais)

Fonte: Adaptado de BYD (2020), Scania (2020), Mercedes (2020) e Salvaro Implementos (2020)

APÊNDICE C – Logística reversa

A logística reversa surgiu no meio empresarial, nos Estados Unidos, no final dos anos 60 com a necessidade de retrabalho de devoluções na produção das fábricas e, alguns anos mais tarde, com a reciclagem de materiais. Em 1983, “prevendo o futuro”, Ballou fazia referência à crescente importância dos canais reversos sobre o papel do cliente.

O autor mencionava a seguinte preocupação relativa ao fluxo reverso: “O movimento de valorização do consumidor, iniciado por Ralph Nader, aumentou a percepção do público para produtos defeituosos [...] os riscos são muito maiores hoje para empresas que não antecipem a possibilidade de recolhimento de um produto” (BALLOU, 1993).

Também de acordo com Lambert (1998), o termo começou a ser usado nos anos 80, mas era compreendido apenas como uma atividade de apoio, como um fluxo reverso do consumidor para o produtor. Somente uma década depois, nos anos 90, autores como Stock (1992) introduziam novas abordagens da logística reversa como perspectiva de negócio, como por exemplo, a logística do retorno dos produtos, redução de recursos, reciclagem e ações para substituição de materiais, reutilização de materiais, disposição final dos resíduos, reaproveitamento, reparação e remanufatura de materiais.

O *Council of Logistics Management* (CLM, 1993, p. 323) conceituou, mas ainda de forma vaga e generalizada, a logística reversa como sendo “[...] um amplo termo relacionado às habilidades e atividades envolvidas no gerenciamento de redução, movimentação e disposição de resíduos de produtos e embalagens [...]”. Somente no final da década, Carter e Ellram (1998) incluíram a questão da eficiência ambiental na definição da logística reversa.

A prática desse conceito tem sido uma ferramenta de gestão ambiental adotada com sucesso em diferentes áreas de gerenciamento de resíduos em vários países. Lambert (1998) entende o canal reverso como parte do canal direto, e não como uma atividade isolada. No ano seguinte, Rogers e Tibben-Lembke (1999) sugerem uma nova proposta da logística empresarial que atue de forma a gerenciar e operacionalizar o retorno de resíduos e coprodutos ao ciclo produtivo, com o propósito de recapturar valor, agregando valor aos mesmos ou adequando seu destino, conforme Pokharel e Mutha (2009).

A evolução desse conceito chegou ao Brasil, ampliando a definição de logística reversa:

[...] uma nova área da logística empresarial, preocupa-se em equacionar a multiplicidade de aspectos logísticos do retorno ao ciclo produtivo destes diferentes tipos de bens industriais, dos materiais constituintes dos mesmos e dos resíduos industriais, por meio da reutilização controlada do bem e de seus componentes ou da reciclagem dos materiais constituintes, dando origem a matérias-primas secundárias que se reintegram ao processo produtivo. (LEITE, 2003)

Por outro lado, Fleischmann (2001) trata a logística reversa como um processo, incorporando-a ao macroprocesso de distribuição, e ressalta a necessidade de recuperar o valor dos bens, produtos ou resíduos, visto ser esta a motivação para a sua comercialização.

Lacerda (2002) conceitua a logística reversa como um processo complementar à logística tradicional, pois enquanto a última tem o papel de levar produtos de sua origem dos fornecedores até os clientes intermediários ou finais, a logística reversa deve completar o ciclo, trazendo de volta os produtos já utilizados dos diferentes pontos de consumo a sua origem.

Leite (2003) completa sua definição entendendo a logística reversa também como uma área da Logística Empresarial, mas que planeja, opera e controla o fluxo, além das informações logísticas correspondentes ao retorno dos bens de pós-venda e de pós-consumo ao ciclo de negócios ou ao ciclo produtivo, por meio de Canais de Distribuição Reversos, agregando-lhes valor de diversas naturezas: econômico, ecológico, legal, logístico, de imagem corporativa, entre outros.

Em outra abordagem, a logística reversa cuida dos fluxos de materiais que se iniciam nos pontos de consumo dos produtos e terminam nos pontos de origem, com o objetivo de

recapturar valor ou de disposição final. Trata do processo de recuperação de materiais diversos por meio da reciclagem (NOVAES, 2004).

Em 2004, o antigo *Council of Logistics Management* (CLM), atual *Council of Supply Chain Management Professionals* (CSCMP, 2004), evolui a conceituação do termo com relação ao CLM (1993), considerando que logística reversa é uma das partes presentes na logística empresarial, que por sua vez, integra o gerenciamento da cadeia de suprimentos, também chamado de *Supply Chain Management*.

Esse conselho define a logística

[...] como uma parte do processo de gestão da cadeia de suprimentos que planeja, implementa e controla o fluxo direto e reverso e a armazenagem eficiente e eficaz de bens, serviços e informações relacionadas, do seu ponto de origem até o seu ponto de consumo, de maneira a satisfazer as necessidades dos clientes. (CSCMP, 2004)

No Brasil, a PNRS (BRASIL, 2010) define a logística reversa como um instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada. A Lei nº 12.305, de 2010, também estabelece os princípios e objetivos dessa política, como por exemplo, o de prevenção e precaução, com uma visão sistêmica da gestão integrada dos resíduos sólidos, visando o desenvolvimento sustentável, ecoeficiência e o reconhecimento de resíduos sólidos como bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania.

Nesse sentido, a definição oficial do Conselho Executivo de Logística Reversa (RLEC, 2015, p. 15) concede maior importância ao termo, conceituando-o como “[...] processo de movimentação de mercadorias do seu destino final típico para outro ponto, com o objetivo de obter valor de outra maneira indisponível, ou com o objetivo de efetuar a disposição final dos produtos”. Logo, as atividades da logística reversa incluem: processamento do retorno de mercadorias por danos, sazonalidade, reestocagem; salvados e excesso do estoque; reciclagem dos materiais das embalagens ou reutilização de embalagens, acondicionamento ou manufatura dos produtos; descarte de equipamentos obsoletos ou materiais perigosos; e recuperação de patrimônio.

No entanto, no entendimento de Costa et al. (2014), a logística reversa não é somente um processo a ser implementado pela organização, mas uma filosofia que deve ser considerada

sob diversos pontos de vista, sendo traduzida para a estratégia e, então, para os processos operacionais da organização.

Finalmente, em 2015, o CSCMP altera seu conceito, concedendo-lhe maior importância: “[...] um segmento especializado da logística que foca o movimento e gerenciamento de produtos e materiais após a venda e após a entrega ao consumidor. Inclui produtos retornados para reparo e/ou reembolso financeiro”.

Mueller (2005) também ressalta as diferenças entre a logística convencional e seu sistema reverso, dentre as quais estão: na cadeia logística convencional os produtos são puxados pelo sistema, enquanto que, na logística reversa, existe uma combinação entre puxar e empurrar os produtos pela cadeia de suprimentos; os canais de venda e fluxos logísticos reversos não se dispõem de forma divergente, como os fluxos convencionais, mas podem ser divergentes e convergentes ao mesmo tempo.

Novaes (2004) entende que uma forma de melhorar o desempenho do SCM é o uso de mais de um canal de distribuição, os chamados canais múltiplos. Sob uma ótica mais ampliada, a logística reversa, nesse caso, pode ser compreendida como um canal multimodal conectivo Origem-Origem, entre diferentes cadeias, utilizando infraestrutura já existente. O autor conclui que logística e logística reversa são a mesma coisa e o que de fato existe é a logística para canais de distribuição reversos e muito misticismo em torno do nome ‘Logística Reversa’.

Motivos e Fatores Críticos de Sucesso

Dentre os principais motivos que levam as empresas a atuarem em logística reversa, Mueller (2005) enfatiza a legislação ambiental, que força as empresas a retornarem seus produtos e cuidar do tratamento necessário; os benefícios econômicos do uso de produtos que retornam ao processo de produção, ao invés dos altos custos do correto descarte do lixo; a crescente conscientização ambiental dos consumidores; a diferenciação por serviço; a fidelização do cliente; a limpeza do canal de distribuição; a proteção de margem de lucro e a recaptura de valor e recuperação de ativos.

De acordo com Rogers e Tibben-Lembke (1999), em uma pesquisa realizada nos EUA, as organizações optam pelo canal reverso principalmente em razão do ganho de competitividade, seguido pela limpeza do canal (redução custos de estoque) e em respeito às legislações.

No Brasil, segundo Leite (2003), a mesma pesquisa revelou que o principal motivo apontado foi o aumento de competitividade, seguido do cumprimento à legislação e aos princípios de ecologia e sustentabilidade. O autor ainda destaca outros importantes motivos, consolidação da imagem corporativa; responsabilidade social: geração de novas atividades econômicas, empregos e renda; incentivo à pesquisa de desenvolvimento de tecnologias de materiais, de reuso e reciclagem; responsabilidade ambiental: diminuição do volume de deposição final de produtos que possam ser revalorizados; redução do consumo de matérias-primas virgens; retornos financeiros apreciáveis; melhoria da competitividade devido ao nível de serviço diferenciado.

Felizardo et al. (2002) acrescentam mais alguns fatores a serem considerados na modelagem dos canais reversos:

- a) os custos, ainda não bem definidos e de difícil avaliação;
- b) a oferta de materiais reciclados, permitindo a continuidade industrial necessária;
- c) a qualidade, que deve ser adequada ao processo industrial e constante para garantir rendimentos operacionais economicamente competitivos;
- d) a tecnologia e o teor de determinada matéria-prima podem variar em função do produto de pós-consumo utilizado, redundando em custos diferentes e orientando o mercado de pós-consumo para aquele que se apresente mais conveniente;
- e) a logística e as características da logística das matérias de pós-consumo e, em particular, sua transportabilidade, revela-se de enorme importância na estruturação e eficiência dos canais reversos;
- f) o mercado, que precisa ser dimensionado, quantitativa e qualitativamente, para os produtos fabricados com materiais reciclados;
- g) a ecologia e os novos comportamentos passam a exigir novas posições estratégicas das empresas sobre o impacto de seus produtos e processos industriais;
- h) o governo com a legislação, subsídios que afetam o interesse nos materiais reciclados;
- i) a Responsabilidade Social e decorrente valorização social e possibilidade de produção e consumo de produtos ecologicamente corretos.

APÊNDICE D – Localização e estimativa de demanda do mercado de construção

Figura 0-36 – Localização das cidades com fábricas de clínquer
Fonte: Adaptado de SNIC (2021) e QGIS (2020)



Figura 0-37 – Localização das cidades com fábricas de cerâmica vermelha
 Fonte: Adaptado de Brasil (2007) e QGIS (2020)

Tabela 0-1 – Estimativa de clínquer por fábricas – somente cidades com produção – Brasil

Nome da Fábrica	Cidade	Estado	Região	Cap_Mensal_scs_	share Cap. Fab. Por Estado	Prod 2019 (t)	Dem Cim. (t)	Dem CLQ (t)	Dem Coproduto (t/ano)
Cimento Açai - Açailândia	Açailândia	MA	NE	600.000	18%	298321	52.645	36552	3.838
SUPREMO - Adrianópolis/PR	Adrianópolis	PR	S	2.000.000	15%	6151551	898.037	623511	
ELIZABETH - Alhandra/PB	Alhandra	PB	NE	1.600.000	17%	2814388	479.045	332603	34.923
INTERCEMENT - Apiaí	Apiaí	SP	SE	3.000.000	21%	5234789	1.109.849	770574	80.910
CSN - Arcos	Arcos	MG	SE	1.000.000	4%	14997734	604.747	419879	44.087
CRH - Arcos	Arcos	MG	SE	800.000	3%	14997734	483.798	335903	
ICIBRA - ITAQUI/Bacabeira-Ma	Bacabeira	MA	NE	100.000	3%	298321	8.774	6092	640
ITAMBÉ - Balsa Nova	Balsa Nova	PR	S	4.500.000	33%	6151551	2.020.582	1402900	147.305
MIZU - Baraúnas	Baraúnas	RN	NE	4.000.000	78%	797663	619.544	430153	
NASSAU-Itapuí	Barbalha	CE	NE	550.000	8%	2241981	184.043	127782	13.417
VOTORANTIM - Barcarena	Barcarena	PA	N	1.250.000	20%	806147	163.851	113763	
LafargeHolcim - Barroso	Barroso	MG	SE	6.000.000	24%	14997734	3.628.484	2519275	264.524
INTERCEMENT - Bodoquena	Bodoquena	MS	CO	2.500.000	79%	700583	554.259	384825	40.407
INTERCEMENT - Brumado	Brumado	BA	NE	400.000	13%	1176294	151.780	105382	
LafargeHolcim - Caaporá	Caaporá	PB	NE	2.800.000	30%	2814388	838.328	582056	61.116
Cimento Forte - Suape/PE	Cabo de Santo Agostinho	PE	NE	1.000.000	23%	3173180	737.949	512362	
INTERCEMENT* - Cabo (Suspensa)	Cabo de Santo Agostinho	PE	NE	750.000	17%	3173180	553.462	384271	
NASSAU-Itabira	Cachoeiro do Itapemirim	ES	SE	3.000.000	52%	682251	352.888	245012	
INTERCEMENT - Cajati	Cajati	SP	SE	1.600.000	11%	5234789	591.920	410973	43.152
INTERCEMENT - Campo Formoso	Campo Formoso	BA	NE	1.400.000	45%	1176294	531.230	368835	38.728
MIZU - Campo Grande	Campo Grande	RJ	SE	1.500.000	13%	2975418	400.280	277917	29.181
LafargeHolcim - Candelias	Candelias	BA	NE	500.000	16%	1176294	189.725	131727	
INTERCEMENT - Candiota	Candiota	RS	S	750.000	13%	1357166	177.022	122907	12.905
LafargeHolcim - Cantagalo	Cantagalo	RJ	SE	2.000.000	18%	2975418	533.707	370556	38.908
VOTORANTIM - Cantagalo	Cantagalo	RJ	SE	1.800.000	16%	2975418	480.337	333500	
CRH - Cantagalo	Cantagalo	RJ	SE	1.800.000	16%	2975418	480.337	333500	
NASSAU - Cibrasa	Capanema	PA	N	1.200.000	20%	806147	157.297	109212	
TUPI - Carandaí	Carandaí	MG	SE	4.000.000	16%	14997734	2.218.989	1679516	176.349
PAJEU Cimentos - Carnaliba/PE	Carnaliba	PE	NE	300.000	7%	3173180	221.385	153708	16.139
VOTORANTIM - Pecém	Caucaia	CE	NE	1.250.000	19%	2241981	418.280	290414	30.493
APODI - Caucaia	Caucaia	CE	NE	900.000	13%	2241981	301.162	209098	
INTERCEMENT - Cezarina	Cezarina	GO	CO	1.000.000	21%	1919705	408.448	283587	29.777
LafargeHolcim - Cocalzinho	Cocalzinho de Goiás	GO	CO	700.000	15%	1919705	285.914	198511	
NASSAU-Itapicuru	Codó	MA	NE	650.000	19%	298321	57.032	39598	4.158
VOTORANTIM - Corumbá	Corumbá	MS	CO	660.000	21%	700583	146.324	101594	10.667
INTERCEMENT - Cubatão	Cubatão	SP	SE	1.600.000	11%	5234789	591.920	410973	
VOTORANTIM* - Cubatão (Suspensa)	Cubatão	SP	SE	1.100.000	8%	5234789	406.945	282544	43.152
VOTORANTIM - Cuiabá	Cuiabá	MT	CO	2.000.000	49%	1128163	550.323	382092	40.120
Cimento Elo - Currais Novos	Currais Novos	RN	NE	350.000	7%	797663	54.210	37638	3.952
VOTORANTIM - Edealina/GO	Edealina	GO	CO	3.000.000	64%	1919705	1.225.344	850762	89.330
VOTORANTIM - Esteio	Esteio	RS	S	1.600.000	28%	1357166	377.646	262202	
NASSAU-Itapessoca	Goiânia	PE	NE	1.000.000	23%	3173180	737.949	512362	53.798
VOTORANTIM - Imbituba	Imbituba	SC	S	1.800.000	35%	1503260	520.359	361288	37.935
NASSAU - Itacimpassa	Itaituba	PA	N	1.700.000	28%	806147	222.837	154717	
VOTORANTIM - Itajaí	Itajaí	SC	S	800.000	15%	1503260	231.271	160572	16.860
VOTORANTIM - Itaú de Minas	Itaú de Minas	MG	SE	4.500.000	18%	14997734	2.721.363	1889456	198.393
NASSAU-Itaguarana	Itaúcuçu	BA	NE	800.000	26%	1176294	303.560	210763	
INTERCEMENT - Jacareí	Jacareí	SP	SE	550.000	4%	5234789	203.472	141272	14.834
INTERCEMENT* - João Pessoa	João Pessoa	PB	NE	2.500.000	27%	2814388	748.507	519692	54.568
VOTORANTIM - Laranjeiras	Laranjeiras	SE	NE	3.300.000	59%	1892670	1.115.323	774375	
MIZU - Manaus	Manaus	AM	N	700.000	100%	334101	334.101	231968	
CIMENTO ZUMBI - Mal. Deodoro/AL	Marachal Deodoro	AL	NE	800.000	40%	281858	112.743	78278	16.182
MIZU - Mogi das Cruzes	Mogi das Cruzes	SP	SE	600.000	4%	5234789	221.970	154115	16.182
LafargeHolcim - Montes Claros	Montes Claros	MG	SE	1.600.000	6%	14997734	967.596	671807	70.540
NASSAU-Itapetinga	Mossoró	RN	NE	800.000	16%	797663	123.909	86031	9.033
NASSAU-Itaguassú	N. S. Socorro	SE	NE	1.500.000	27%	1892670	506.965	351988	
VOTORANTIM - Nobres	Nobres	MT	CO	2.100.000	51%	1128163	577.840	401197	42.126
INTERCEMENT - Nova Santa Rita	Nova Santa Rita	RS	S	2.300.000	40%	1357166	542.866	376915	39.576
MIZU - Pacatuba	Pacatuba	SE	NE	800.000	14%	1892670	270.381	187727	19.711
Cimento Uau - Pains/MG	Pains	MG	SE	400.000	2%	14997734	241.899	167952	17.635
VOTORANTIM - Paulista	Paulista	PE	NE	1.250.000	29%	3173180	922.436	640452	67.247
VOTORANTIM - Pinheiro Machado	Pinheiro Machado	RS	S	1.100.000	19%	1357166	259.632	180264	18.928
BRENNAND - Pitimbu/PB	Pitimbu	PB	NE	2.500.000	27%	2814388	748.507	519692	54.568
SUPREMO - Pomerode	Pomerode	SC	S	500.000	10%	1503260	144.544	100358	10.538
VOTORANTIM - Porto Velho	Porto Velho	RO	N	1.200.000	100%	178979	178.979	124266	13.048
VOTORANTIM - Primavera	Primavera	PA	N	2.000.000	33%	806147	262.162	182020	
APODI - Quixeré	Quixeré	CE	NE	1.500.000	22%	2241981	501.936	348497	36.592
VOTORANTIM* - Ribeirão (Suspensa)	Ribeirão Grande	SP	SE	3.000.000	21%	5234789	1.109.849	770574	
VOTORANTIM - Rio Branco	Rio Branco do Sul	PR	S	7.200.000	53%	6151551	3.232.932	2244641	235.687
VOTORANTIM - Salto de Pirapora	Salto de Pirapora	SP	SE	1.100.000	8%	5234789	406.945	282544	
LafargeHolcim - Santa Cruz	Santa Cruz	RJ	SE	800.000	7%	2975418	213.483	148222	15.563
VOTORANTIM - Santa Helena	Santa Helena	SP	SE	1.100.000	8%	5234789	406.945	282544	29.667
CRH - Santa Luzia	Santa Luzia	MG	SE	800.000	3%	14997734	483.798	335903	35.270
INTERCEMENT - Santana do Paraíso	Santana do Paraíso	MG	SE	800.000	3%	14997734	483.798	335903	
Bravo - São Luís/MA	São Luís	MA	NE	800.000	24%	298321	70.193	48735	
VOTORANTIM - São Luís	São Luís	MA	NE	1.250.000	37%	298321	109.677	76149	7.996
INTERCEMENT - São Miguel dos Campos	São Miguel dos Campos	AL	NE	1.200.000	60%	281858	169.115	117417	12.329
VOTORANTIM - Santa Cruz	Sepetiba	RJ	SE	2.500.000	22%	2975418	667.134	463195	
LafargeHolcim - Serra	Serra	ES	SE	2.200.000	38%	682251	258.785	179676	18.866
BRENNAND - Sete Lagoas	Sete Lagoas	MG	SE	1.600.000	6%	14997734	967.596	671807	70.540
VOTORANTIM - Sobradinho	Sobradinho	DF	CO	3.700.000	59%	2450754	1.439.332	999335	104.930
CIPLAN - Sobradinho	Sobradinho	DF	CO	2.600.000	41%	2450754	1.011.422	702236	
VOTORANTIM - Sobral	Sobral	CE	NE	2.500.000	37%	2241981	836.560	580828	60.987
LafargeHolcim - Sorocaba	Sorocaba	SP	SE	500.000	4%	5234789	184.975	128429	13.485
LIZ - Vespasiano	Vespasiano	MG	SE	3.300.000	13%	14997734	1.995.666	1385601	145.488
VOTORANTIM - Vidal Ramos	Vidal Ramos	SC	S	2.100.000	40%	1503260	607.086	421503	44.258
MIZU - Vitória	Vitória	ES	SE	600.000	10%	682251	70.578	49002	5.145
VOTORANTIM - Volta Redonda	Volta Redonda	RJ	SE	750.000	7%	2975418	200.140	138958	14.591
VOTORANTIM - Xambioá	Xambioá	TO	N	2.200.000	100%	571931	571.931	397095	
						TOTAL	53.668.887	37.262.577	2.905.091

Fonte: Adaptado de SNIC (2019a), Cimento (2017) e ABNT (2018)

Tabela 0-2 – Classificação de tamanho de minas por faixas de produção bruta (t/ano)

Portes das minas	Classes	Classificação		Produção considerada (t/ano)
		Maior que	Menor ou igual a	
Grandes	G2	3.000.000		
	G1	1.000.000	3.000.000	
Médias	M4	500.000	1.000.000	
	M3	300.000	500.000	
	M2	150.000	300.000	
	M1	100.000	150.000	
Pequenas	P3	50.000	100.000	
	P2	20.000	50.000	
	P1	10.000	20.000	

Classificação (t/ano)	Produção (t/ano)		Classificação	Produção considerada (t/ano)
	>=	<=		
G1	1,000,000	3,000,000	G1	2.000.000
G2	3,000,000		G2	3.000.000
M1	100,000	150,000	M1	125.000
M2	150,000	300,000	M2	225.000
M3	300,000	500,000	M3	400.000
M4	500,000	1,000,000	M4	750.000
P1	10,000	20,000	P1	15.000
P2	20,000	50,000	P2	35.000
P3	50,000	100,000	P3	75.000

Fonte: Adaptado de Brasil (2007)

Tabela 0-3 – Amostra da estimativa de demanda (t/ano) das cidades com empresas de concreto

Cidade	ESTADO	Região	População Cidade	DEMANDA CONC. POR ESTADO (t/ano)	População do Estado	% Pop. Cid/Est.	Micro Região	% Pop. Micro Região /Estado (Ibge 2010)	DEMANDA CONC POR MICRO REGIAO EM (t/ano)	% POP CID/MICRO	DEMANDA CONC POR CIDADE EM (t/ano)
Açailândia	MA	NE	113.121	2.297	7.114.598	2%	Imperatriz	9%	198	68%	37
Adamantina	SP	SE	35.111	140.015	46.289.333	0%	Adamantina	0%	537	100%	106
Água Branca	SP	SE	17.470	140.015	46.289.333	0%	Serra do Teixeira	3%	4308	100%	53
Alagoinhas	BA	NE	152.327	17.631	14.930.634	1%	Alagoinhas	2%	388	100%	180
Alfenas	MG	SE	80.494	299.150	21.292.666	0%	Alfenas	1%	3439	100%	1131
Alto Horizonte	TO	N	6.605	2.150	1.590.248	0%	Porangatu	4%	83	2%	9
Anápolis	GO	CO	391.772	27.826	7.113.540	6%	Anápolis	9%	2506	100%	1532
Angra dos Reis	RJ	SE	207.044	47.057	17.366.189	1%	Baía da Ilha Grande	1%	609	100%	561
APARECIDA DE GOIÂNIA	GO	N	590.146	27.826	7.113.540	8%	Goânia	35%	9810	42%	2308
Apucarana	PR	S	136.234	195.240	11.516.840	1%	Apucarana	3%	5367	100%	2310
Aracaju	SE	NE	664.908	7.966	2.318.822	29%	Aracaju	40%	3219	90%	2284
Aracati	CE	NE	74.975	7.119	9.187.103	1%	Litoral de Aracati	1%	92	100%	58
Aracruz	ES	SE	103.101	15.235	4.064.052	3%	Linhares	9%	1338	47%	387
Araguari	MG	SE	117.825	299.150	21.292.666	1%	Uberlândia	4%	12466	28%	1655
Araranguá	SC	S	68.867	38.003	7.252.502	1%	Araranguá	3%	1096	22%	361
Araraquara	SP	SE	238.339	140.015	46.289.333	1%	Araraquara	1%	1705	64%	721
Araruama	RJ	SE	134.293	47.057	17.366.189	1%	Lagos	3%	1585	41%	364
ARAXÁ	MG	SE	107.337	299.150	21.292.666	1%	Araxá	1%	3122	59%	1508
Arcos	MG	SE	40.380	299.150	21.292.666	0%	Formiga	1%	2322	100%	567
Armação dos Búzios	RJ	SE	34.477	47.057	17.366.189	0%	Lagos	3%	1585	9%	93
Arraias	TO	CO	10.534	2.150	1.590.248	1%	Dianópolis	9%	184	100%	14
Atibaia	SP	SE	144.088	140.015	46.289.333	0%	Bragança Paulista	1%	1691	51%	436
Barbacena	MG	SE	138.204	299.150	21.292.666	1%	Barbacena	1%	3390	100%	1942
Barbalha	CE	NE	61.228	7.119	9.187.103	1%	Cariri	6%	450	100%	47
Barra Bonita	SP	SE	36.126	140.015	46.289.333	0%	Jau	1%	1176	24%	109
Barra do Pirai	RJ	SE	100.764	47.057	17.366.189	1%	Barra do Pirai	1%	516	87%	273
Barro Alto	GO	CO	15.054	27.826	7.113.540	0%	Ceres	4%	1071	2%	59
Barueri	SP	SE	276.982	140.015	46.289.333	1%	Osasco	4%	6025	8%	838
Bauru	SP	SE	379.297	140.015	46.289.333	1%	Bauru	1%	1908	11%	1147
Belford Roxo	RJ	SE	513.118	47.057	17.366.189	3%	Rio de Janeiro	73%	34143	13%	1390
Belo Horizonte	MG	SE	2.521.564	299.150	21.292.666	12%	Belo Horizonte	24%	72860	69%	35427
Bento Gonçalves	RS	S	121.803	25.365	11.422.973	1%	Caxias do Sul	7%	1831	27%	270
Bertioga	SP	SE	64.723	140.015	46.289.333	0%	Santos	4%	4989	7%	196
Betim	MG	SE	444.784	299.150	21.292.666	2%	Belo Horizonte	24%	72860	12%	6249

APÊNDICE E – Análise de capacidades dos gargalos dos corredores em (t/sem)

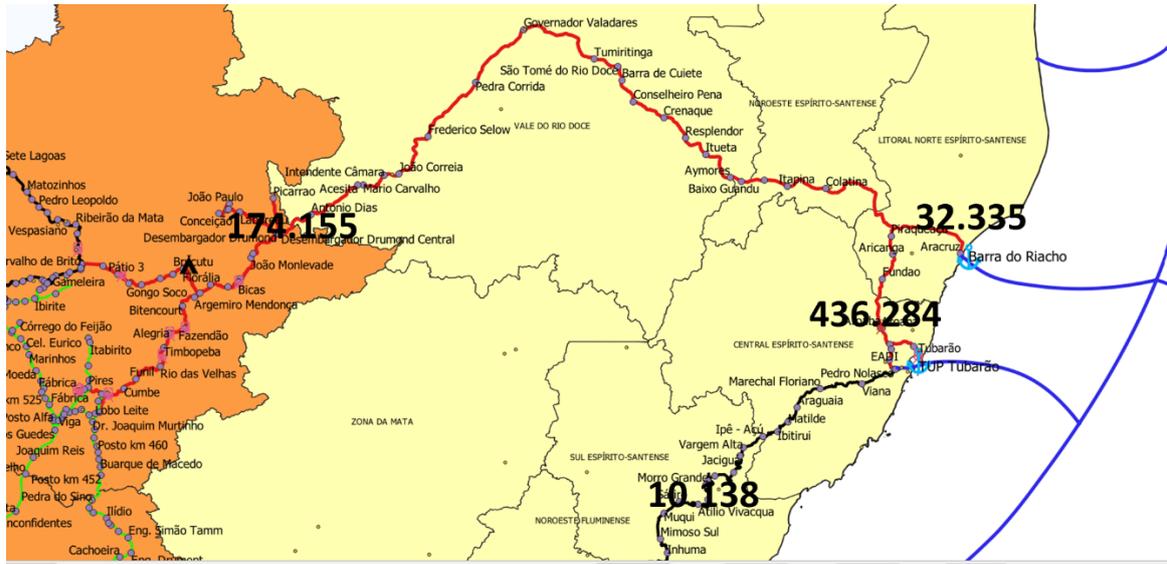


Figura 0-39 – Corredor EFVM Leste e Cabotagem Costa Nordeste e Sul/Sudeste
 Fonte: ANTT (2022a)

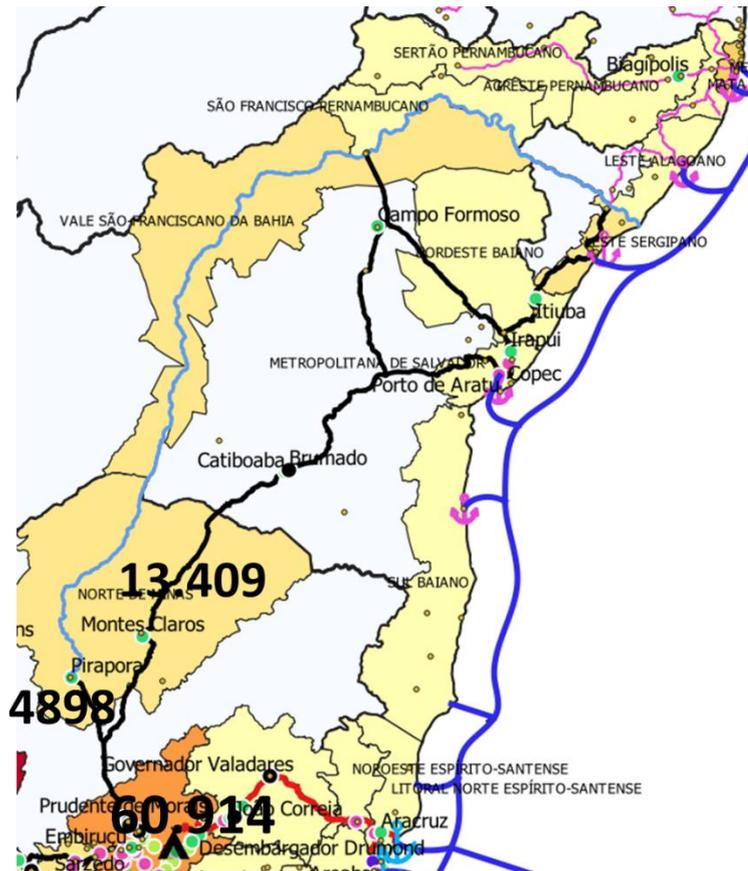


Figura 0-40 – Corredor FCA Nordeste e Hidrovia São Francisco
 Fonte: ANTT (2022a)

APÊNDICE F – Custos logísticos

Tabela 0-4 – Custo logístico aquaviário, opção F, quatro *hubs* TUPs (próprios)

		VALOR DO DOLAR		5,38		0,055 (R\$/km/t)							
HUB Portuário Marítimo - Destino	Tipo de HUB	HUB Portuário Origem	Tarifa de Operação portuária Marítima, (Taxas devidas pelo Armador ou Agente) (R\$/t)	Tarifa de Operação portuária Terrestre, Movimentação portuária (R\$/t) Utilização da Infraestrutura de proteção e Acesso Aquaviário	Custo Operação de Aluguel Equipamentos e MDO pra movimentação interna de carga - Carregamento (R\$/t)	Custo de Armazenagem Hub de Origem (R\$/t) p 30 dias	Distância marítima Hub Origem (km)	Custo de Navegação marítimo (R\$/t)	Tarifa de Operação portuária Marítima, (Taxas devidas pelo Armador ou Agente) (R\$/t)	Custo de Operação portuária Terrestre, Movimentação portuária (R\$/t) Utilização da Infraestrutura de proteção e Acesso Aquaviário	Custo Operação de Aluguel Equipamentos e MDO pra movimentação interna de carga Descarregamento (R\$/t)	Custo Armazenagem Hub Destino (R\$/t/15 dias)	CUSTO LOG. AQUAV. TOTAL
TIPLAN	TUP - Terminal de Uso Privativo - VLI	Tubarão (VLI) - Vitória	1,9	2,5	1,4	13,4	889	49	4,0	0,10	3,4	4,4	80
TPSL Terminal Portuário São Luís	Terminal de Uso Privativo - VLI	Tubarão (VLI) - Vitória	1,9	2,5	1,4	13,4	3.043	167	1,9	4,0	2,4	4,4	199
TUP Pecém	Terminal de Uso Privativo - VLI	Tubarão (VLI) - Vitória	1,9	2,5	1,4	13,4	2.272	125	4,5	1,6	2,3	4,4	157
TMIB	Terminal de Uso Privativo - VLI	Tubarão (VLI) - Vitória	1,9	2,5	1,4	13,4	1.130	62	3,6	4,1	2,3	4,4	96

Fonte: ANTAQ (2002)

Tabela 0-5 – Custo logístico aquaviário, opção G, 24 *hubs* Portos Organizados (públicos e privados)

		0,055 (R\$/km/t)											
HUB Portuário Marítimo - Destino	Tipo de HUB	HUB Portuário Origem	Tarifa de Operação portuária Marítima, (Taxas devidas pelo Armador ou Agente)	Tarifa de Operação portuária Terrestre, Movimentação portuária (R\$/t) Utilização da Infraestrutura de proteção e Acesso Aquaviário	Custo Operação de Aluguel Equipamentos e MDO pra movimentação interna de carga - Carregamento (R\$/t)	Custo de Armazenagem Hub de Origem (R\$/t) p 30 dias	Distância marítima Hub Origem (km)	Custo de Navegação marítimo (R\$/t)	Tarifa de Operação portuária Marítima, (Taxas devidas pelo Armador ou Agente)	Custo de Operação portuária Terrestre, Movimentação portuária (R\$/t) Utilização da Infraestrutura de proteção e Acesso Aquaviário	Custo Operação de Aluguel Equipamentos e MDO pra movimentação interna de carga	Custo Armazenagem Hub Destino (R\$/t/15 dias)	CUSTO LOG. AQUAV. TOTAL
Antonina	Porto Organizado	TUP Porto Sudeste-Itajaí	6,5	6,5	0,0	13,4	620	34	1,2	2,8	2	4,35	71
Belém	Porto Organizado	BARRA DO RIACHO - ARACRUZ - ES	1,9	2,5	1,4	13,4	3.541	194	1,9	4,0	1,27	4,35	219
Cabedelo	Porto Organizado	BARRA DO RIACHO - ARACRUZ - ES	1,9	2,5	1,4	13,4	1.602	88	2,2	3,5	1,28	4,35	113
Fortaleza	Porto Organizado	BARRA DO RIACHO - ARACRUZ - ES	1,9	2,5	1,4	13,4	2.222	122	4,5	1,6	2,3	4,35	148
Ilhéus	Porto Organizado	BARRA DO RIACHO - ARACRUZ - ES	1,9	2,5	1,4	13,4	641	35	4,0	5,1	2,3	4,35	64
Imbituba	Porto Organizado	TUP Porto Sudeste-Itajaí	6,5	6,5	0,0	13,4	802	44	2,3	3,7	2,3	4,35	79
Itajaí	Porto Organizado	TUP Porto Sudeste-Itajaí	6,5	6,5	0,0	13,4	678	37	4,1	3,76	2,3	4,35	74
Itaquí	Porto Organizado	BARRA DO RIACHO - ARACRUZ - ES	1,9	2,5	1,4	13,4	2.972	163	2,5	2,4	2,3	4,35	188
Macapá	Porto Organizado	BARRA DO RIACHO - ARACRUZ - ES	1,9	2,5	1,4	13,4	3.276	180	1,5	3,1	4,06	4,35	206
Maceió	Porto Organizado	BARRA DO RIACHO - ARACRUZ - ES	1,9	2,5	1,4	13,4	1.681	92	3,6	4,1	2,3	4,35	120
Manaus	Porto Organizado	BARRA DO RIACHO - ARACRUZ - ES	1,9	2,5	1,4	13,4	5.189	285	1,5	2,8	5,47	4,35	312
Natal	Porto Organizado	BARRA DO RIACHO - ARACRUZ - ES	1,9	2,5	0,0	13,4	1.741	96	3,2	2,4	2,3	4,35	121
Paranaguá	Porto Organizado	TUP Porto Sudeste-Itajaí	6,5	6,5	0,0	13,4	596	33	1,2	2,8	2	4,35	65
Pelotas	Porto Organizado	TUP Porto Sudeste-Itajaí	6,5	6,5	0,0	13,4	1.417	78	0,7	0,15	0,55	4,35	105
Porto Alegre	Porto Organizado	TUP Porto Sudeste-Itajaí	6,5	6,5	0,0	13,4	1.671	92	1,3	0,93	2,3	4,35	123
Porto Velho	Porto Organizado	BARRA DO RIACHO - ARACRUZ - ES	1,9	2,5	1,4	13,4	5.730	314	1,0	0,8	1,16	4,35	335
Rio Grande	Porto Organizado	TUP Porto Sudeste-Itajaí	6,5	6,5	0,0	13,4	1.367	75	1,9	0,26	3,02	4,35	106
Salinas	Porto Organizado	BARRA DO RIACHO - ARACRUZ - ES	1,9	2,5	1,4	13,4	2.046	112	3,5	7,7	1,8	4,35	143
Salvador	Porto Organizado	BARRA DO RIACHO - ARACRUZ - ES	1,9	2,5	1,4	13,4	837	46	4,0	5,1	2,3	4,35	75
Santarém	Porto Organizado	BARRA DO RIACHO - ARACRUZ - ES	1,9	2,5	1,4	13,4	4.421	243	1,9	4,0	1,27	4,35	267
Santos / TIPLAN	Porto Organizado	TUP Porto Sudeste-Itajaí	6,5	6,5	0,0	13,4	354	19	4,0	0,10	3,39	4,35	53
São Francisco do Sul	Porto Organizado	TUP Porto Sudeste-Itajaí	6,5	6,5	0,0	13,4	648	36	1,43	1,43	2,3	4,35	67
São Sebastião	Porto Organizado	TUP Porto Sudeste-Itajaí	6,5	6,5	0,0	13,4	215	12	0,3	0,21	2,3	4,35	41
Suape	Porto Organizado	BARRA DO RIACHO - ARACRUZ - ES	1,9	2,5	1,4	13,4	1.422	78	3,2	2,5	2,3	4,35	104
Vila do Conde	Porto Organizado	BARRA DO RIACHO - ARACRUZ - ES	1,9	2,5	1,4	13,4	3.573	196	1,9	4,0	2,35	4,35	222

Fonte: ANTAQ (2002)

Tabela 0-6 – Custo Logístico aquaviário – Hidrovia Paraná-Tietê

Cidade	Nome	ESTADO	Região	CUSTO LOGÍSTICO TIEÇO (R\$) (R\$/T/ROD)	Custo de Transporte (R\$/T/ROD)	HUB PORTO	Tarifa de Operação portuária (R\$/T/ROD)	Custo Operacional de Aluguel Equipamentos (R\$/T/ROD)	Custo de Armazenagem (R\$/T/ROD)	Dist. Entre portos (km)	Custo de Navegação marítima (R\$/T/ROD)	Custo de Navegação marítima (R\$/T/ROD)	HUB Portuário	Tarifa de Operação portuária Marítima (R\$/T/ROD)	Tarifa de Operação portuária (R\$/T/ROD)	Custo Operacional de Aluguel Equipamentos (R\$/T/ROD)	Custo de Armazenagem (R\$/T/ROD)	CUSTO LOGÍSTICO AQUAVIÁRIO	D RETA	D ROTA	Custo de Transporte/Complemento ROD (R\$/T)	Custo Frete Rodov. (R\$/T)	Lucro + 15% (R\$/T)	Pedágio (R\$/T)	CUSTO FRETE TOTAL (R\$/T)	CLT CEN			
																											ROD	ROD	ROD
Tiês Lages	CONCRETO	MS	CO	157	1	Tiês - Paraná	1,9	4,0	1,3	1,3	200	0,059	12	TUP Terminal Intermodal Cap/ (Tres)	1,9	4,0	1,3	0,13	27,4	8	10	9	4	1	0	14	199		
BRASÍLIA	CONCRETO	MS	CO	157	1	Tiês - Paraná	1,9	4,0	1,3	1,3	271	0,059	16	Passarama	1,9	4,0	1,3	0,13	31,6	218	35	9	7	1	0	17	207		
Juruápolis	CONCRETO	SP	SE	157	1	Tiês - Paraná	1,9	4,0	1,3	1,3	271	0,059	16	Passarama	1,9	4,0	1,3	0,13	31,6	47	53	9	10	1	0	20	210		
Ubatuba	CONCRETO	GO	CO	157	1	Tiês - Paraná	1,9	4,0	1,3	1,3	300	0,059	18	Ascutuba	1,9	4,0	1,3	0,13	33,3	44	48	9	9	1	37	2	21	213	
Piedade	CONCRETO	SP	SE	157	1	Tiês - Paraná	1,9	4,0	1,3	1,3	300	0,059	18	Ascutuba	1,9	4,0	1,3	0,13	33,3	60	65	9	11	2	43	3	24	216	
Barbosa	CERAMICA VERMELHA	SP	SE	157	1	Tiês - Paraná	1,9	4,0	1,3	1,3	300	0,059	18	Ascutuba	1,9	4,0	1,3	0,13	33,3	60	72	9	12	2	43	3	25	217	
Adrianópolis	CONCRETO	SP	SE	157	1	Tiês - Paraná	1,9	4,0	1,3	1,3	271	0,059	16	Passarama	1,9	4,0	1,3	0,13	31,6	89	97	9	15	2	0	26	216		
Iaci	CONCRETO	SP	SE	157	1	Tiês - Paraná	1,9	4,0	1,3	1,3	300	0,059	18	Ascutuba	1,9	4,0	1,3	0,13	33,3	923	98	9	15	2	0	27	218		
Camuçu	CONCRETO	RS	S	157	1	Tiês - Paraná	1,9	4,0	1,3	1,3	795	0,059	47	TUP Santa Helena	1,9	4,0	1,3	0,13	62,5	306	739					68	4	4	225
Colúlia	CONCRETO	RS	S	157	1	Tiês - Paraná	1,9	4,0	1,3	1,3	795	0,059	47	TUP Santa Helena	1,9	4,0	1,3	0,13	62,5	271	598					68	4	4	225
Ijuí	CONCRETO	RS	S	157	1	Tiês - Paraná	1,9	4,0	1,3	1,3	795	0,059	47	TUP Santa Helena	1,9	4,0	1,3	0,13	62,5	317	611					68	4	4	225
Itarana	CONCRETO	RS	S	157	1	Tiês - Paraná	1,9	4,0	1,3	1,3	795	0,059	47	TUP Santa Helena	1,9	4,0	1,3	0,13	62,5	452	718					68	4	4	225
Jacupé	CONCRETO	SC	S	157	1	Tiês - Paraná	1,9	4,0	1,3	1,3	795	0,059	47	TUP Santa Helena	1,9	4,0	1,3	0,13	62,5	353	521					68	4	4	225
Morau	CONCRETO	RS	S	157	1	Tiês - Paraná	1,9	4,0	1,3	1,3	795	0,059	47	TUP Santa Helena	1,9	4,0	1,3	0,13	62,5	395	631					68	4	4	225
Novo Hamburgo	CERAMICA VERMELHA	RS	S	157	1	Tiês - Paraná	1,9	4,0	1,3	1,3	795	0,059	47	TUP Santa Helena	1,9	4,0	1,3	0,13	62,5	460	713					68,4	4	4	225

Fonte: ANTAQ (2002), com valores monetários atualizados pelo IGP-M (FGV), e BCC (2021)

Tabela 0-7 – Custo Logístico Aquaviário – Hidrovia São Francisco

Cidade	Nome	ESTADO	Região	CUSTO LOGÍSTICO TIEÇO (R\$) (R\$/T/ROD)	Custo de Transporte (R\$/T/ROD)	HUB PORTO	Tarifa de Operação portuária (R\$/T/ROD)	Custo Operacional de Aluguel Equipamentos (R\$/T/ROD)	Custo de Armazenagem (R\$/T/ROD)	Dist. Entre portos (km)	Custo de Navegação marítima (R\$/T/ROD)	Custo de Navegação marítima (R\$/T/ROD)	HUB Portuário	Tarifa de Operação portuária Marítima (R\$/T/ROD)	Tarifa de Operação portuária (R\$/T/ROD)	Custo Operacional de Aluguel Equipamentos (R\$/T/ROD)	Custo de Armazenagem (R\$/T/ROD)	CUSTO LOGÍSTICO AQUAVIÁRIO	D RETA	D ROTA	Custo de Transporte/Complemento ROD (R\$/T)	Custo Frete Rodov. (R\$/T)	Lucro + 15% (R\$/T)	Pedágio (R\$/T)	CUSTO FRETE TOTAL (R\$/T)	CLT CEN	
																											ROD
Juazeiro	CONCRETO	BA	NE	76	1	São Francisco	1,9	4,0	1,3	1,3	1287	0,041	53	Juazeiro	1,9	4,0	1,3	0,13	68,3	10	20	9	5	1	0	15	160
Petrolina	CONCRETO	PE	NE	76	1	São Francisco	1,9	4,0	1,3	1,3	1287	0,041	53	Juazeiro	1,9	4,0	1,3	0,13	68,3	17	25	9	6	1	0	16	161
Campo Formoso	INTERCEMENT - Camy	BA	NE	76	1	São Francisco	1,9	4,0	1,3	1,3	1287	0,041	53	Juazeiro	1,9	4,0	1,3	0,13	68,3	124	150	9	22	3	0	34	179
Igarapé	CERAMICA VERMELHA	BA	NE	76	1	São Francisco	1,9	4,0	1,3	1,3	724	0,059	43	Botafama	1,9	4,0	1,3	0,13	58,3	95	230	9	32	5	0	46	181
Barrão Alto	CONCRETO	GO	CO	76	1	São Francisco	1,9	4,0	1,3	1,3	724	0,059	43	Botafama	1,9	4,0	1,3	0,13	58,3	137	253	9	35	5	0	49	184
Jacobina	CERAMICA VERMELHA	BA	NE	76	1	São Francisco	1,9	4,0	1,3	1,3	1287	0,041	53	Juazeiro	1,9	4,0	1,3	0,13	68,3	196	234	9	33	5	0	47	192
Salgueiro	CONCRETO	PE	NE	76	1	São Francisco	1,9	4,0	1,3	1,3	1287	0,041	53	Juazeiro	1,9	4,0	1,3	0,13	68,3	213	241	9	34	5	0	48	193
Pesqueiro	CONCRETO	CE	NE	76	1	São Francisco	1,9	4,0	1,3	1,3	1287	0,041	53	Juazeiro	1,9	4,0	1,3	0,13	68,3	236	270	9	37	6	0	52	197
Cato	CERAMICA VERMELHA	CE	NE	76	1	São Francisco	1,9	4,0	1,3	1,3	1285	0,041	53	Petrolina	1,9	4,0	1,3	0,13	68,3	269	335	9	46	7	0	61	206
Barbalha	MASAU-Rapal	CE	NE	76	1	São Francisco	1,9	4,0	1,3	1,3	1285	0,041	53	Petrolina	1,9	4,0	1,3	0,13	68,3	265	338	9	46	7	0	62	207
Fronteiras	MASAU-Rapal	PI	NE	76	1	São Francisco	1,9	4,0	1,3	1,3	1285	0,041	53	Petrolina	1,9	4,0	1,3	0,13	68,3	270	338	9	46	7	0	62	207
Novo Olinda	CERAMICA VERMELHA	CE	NE	76	1	São Francisco	1,9	4,0	1,3	1,3	1287	0,041	53	Juazeiro	1,9	4,0	1,3	0,13	68,3	346	357	9	48	7	0	65	210
Carimbá	PAU'S Cimento - Car	PE	NE	76	1	São Francisco	1,9	4,0	1,3	1,3	1287	0,041	53	Juazeiro	1,9	4,0	1,3	0,13	68,3	345	401	9	54	8	0	71	216
Cajueiros	CONCRETO	PR	NE	76	1	São Francisco	1,9	4,0	1,3	1,3	1285	0,041	53	Petrolina	1,9	4,0	1,3	0,13	68,3	35	403	9	54	8	0	71	216
Vila da Conceição	CONCRETO	BA	NE	76	1	São Francisco	1,9	4,0	1,3	1,3	724	0,059	43	Botafama	1,9	4,0	1,3	0,13	58,3	321	495	9	66	10	0	85	220
Feira de Santana	CONCRETO	BA	NE	76	1	São Francisco	1,9	4,0	1,3	1,3	1287	0,041	53	Juazeiro	1,9	4,0	1,3	0,13	68,3	355	437	9	59	9	0	76	221
Itaíba	CONCRETO	GO	CO	76	1	São Francisco	1,9	4,0	1,3	1,3	1287	0,041	53	Juazeiro	1,9	4,0	1,3	0,13	68,3	347	441	9	59	9	0	77	222

Fonte: ANTAQ (2002), com valores monetários atualizados pelo IGP-M (FGV), e BCC (2021)

APÊNDICE G – Estudo paralelo com troca de objetivos

Tabela 0-8 – Otimização multiobjetivo variando diferentes objetivos primários

PARAMETROS DE MODELAGEM				PAR. ECONOMICO	PARÂMETROS AMBIENTAIS NEGATIVOS						PARÂMETROS SOCIAIS POSITIVOS				PARÂMETROS SOCIAIS NEGATIVOS				MATRIZ LOGÍSTICA POR TIPO DE HUB								MITZ LGTK GERAL																		
ESFERAS 3PL	OBJETIVO PRINCIPAL	OBJETIVO SECUNDÁRIO: RESTRIÇÃO DE DESIGUALD.		CLT (R\$/sem)	CLT (R\$/m)	Atividade TÓXICA (g CO2/m³)	Consumo (Litros/20km)	Omissão de pneus (kg)	Pneus (kg/ano)	Emissões PA (kg/ano)	Taxa de Emissão (kg/ano)	Vicim (Cidade)	PIB	Impactos Sociais	Vic. (Parque por ano)	Perdas (Parque)	PER-A	PER-B	PER-C	PER-D	PER-E	CAB-F	CAB-G	HO-4	HO-4	HO-4	HO-4	HO-4	HO-4	HO-4	HO-4	HO-4	HO-4	HO-4	HO-4	HO-4									
		CLT	CONS. COMB	CLT	CONS. COMB	CLT	EMISSIONES DE CO2	CLT	EMISSIONES DE PA	CLT	VAZ ÓLEO	CLT	DETRITOS PNEUS	CLT	PERDAS	CLT	VÍTIMAS FATAIS	CLT	VAGAS	CLT	PIB	CLT	CONS. PNEUS	CLT	RUIDOS	CLT																			
ICD	MIN.	CLT	CONS. COMB	875.000	R\$ 17.098.080	165	3071	894.157	1.406	155	418.794	1.719	2144	R\$ 12.188.889	4.224.218	3,59	422	1%	1%	2%	15%	8%	2%	54%	0%	18%	26%	56%	18%	15%	28%	56%	15%	15%	28%	56%	15%								
ICGAMARJÓK				850.000	R\$ 17.163.142	165	3007	850.068	1.364	150	417.859	1.699	2144	R\$ 12.251.445	4.269.492	3,51	399	4%	0%	4%	15%	8%	1%	55%	0%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%				
ICGAMARJÓK				825.000	R\$ 17.330.933	167	3041	825.067	1.369	153	422.874	1.696	2162	R\$ 12.362.427	4.243.647	3,56	399	4%	1%	4%	12%	10%	1%	55%	0%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%
ICGAMARJÓK				800.000	R\$ 17.734.357	171	3168	800.052	1.461	166	436.616	1.749	2217	R\$ 12.577.501	4.210.727	3,80	399	10%	2%	4%	8%	8%	1%	55%	0%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%
ICGAMARJÓK				85/sem	R\$ 17.831.734	172	3166	796.447	1.459	166	436.691	1.747	2217	R\$ 12.585.280	4.007.285	3,80	399	5%	2%	4%	12%	8%	1%	55%	0%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%
ICGAMARJÓK	MIN.	CONS. COMB	CLT	17500.000	R\$ 17.500.020	168	3078	811.000	1.388	158	428.173	1.707	2184	R\$ 12.454.364	4.519.064	3,65	399	7%	2%	4%	10%	7%	1%	55%	0%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%				
ICGAMARJÓK				17300.000	R\$ 17.300.019	167	3024	829.348	1.377	152	422.011	1.700	2164	R\$ 12.366.747	4.243.647	3,53	399	4%	0%	4%	13%	10%	1%	55%	0%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%
ICGAMARJÓK				17200.000	R\$ 17.200.019	166	3012	844.480	1.367	151	418.979	1.699	2148	R\$ 12.282.926	4.269.492	3,51	399	4%	0%	4%	14%	8%	1%	55%	0%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%
ICGAMARJÓK				17100.000	R\$ 17.100.019	165	3063	888.276	1.400	154	418.757	1.712	2145	R\$ 12.199.772	4.242.299	3,58	422	0%	0%	3%	15%	8%	2%	54%	0%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%
ICGAMARJÓK				85/sem	R\$ 19.322.577	186	4192	1.347.589	2.324	282	503.001	2.192	2400	R\$ 12.580.627	5.284.883	5,70	538	0%	4%	2%	3%	1%	3%	51%	0%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%
ICGAMARJÓK	MIN.	EMISSIONES DE CO2	CLT	17500.000	R\$ 17.500.018	168	3241	941.783	1.531	174	432.354	1.774	2185	R\$ 12.345.512	4.567.895	3,93	445	1%	4%	3%	10%	5%	2%	54%	0%	21%	23%	55%	21%	21%	23%	55%	21%	21%	23%	55%	21%	21%	23%	55%	21%				
ICGAMARJÓK				17300.000	R\$ 17.300.017	167	3199	924.330	1.479	168	426.613	1.750	2166	R\$ 12.173.909	4.293.682	3,83	446	1%	3%	3%	12%	5%	2%	54%	0%	22%	23%	56%	22%	22%	23%	56%	22%	22%	23%	56%	22%	22%	23%	56%	22%	22%	23%	56%	22%
ICGAMARJÓK				17200.000	R\$ 17.200.019	166	3114	891.724	1.406	159	422.237	1.716	2154	R\$ 12.303.336	4.407.827	3,67	426	1%	3%	3%	12%	7%	2%	54%	0%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%
ICGAMARJÓK				17100.000	R\$ 17.100.019	165	3072	894.327	1.408	155	418.818	1.719	2145	R\$ 12.188.906	4.300.451	3,59	422	1%	1%	2%	15%	8%	2%	54%	0%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%
ICGAMARJÓK				85/sem	R\$ 23.605.095	227	6025	2.132.154	2.989	337	624.444	2.682	2978	R\$ 15.668.622	7.176.908	7,01	417	10%	0%	3%	16%	3%	36%	17%	0%	15%	32%	53%	15%	15%	32%	53%	15%	15%	32%	53%	15%	15%	32%	53%	15%	15%	32%	53%	15%
ICGAMARJÓK	MIN.	EMISSIONES DE PA	CLT	17500.000	R\$ 17.500.018	168	3241	941.783	1.531	174	432.354	1.774	2185	R\$ 12.345.512	4.567.895	3,93	445	1%	4%	3%	10%	5%	2%	54%	0%	21%	23%	55%	21%	21%	23%	55%	21%	21%	23%	55%	21%	21%	23%	55%	21%				
ICGAMARJÓK				17300.000	R\$ 17.300.017	167	3199	924.330	1.479	168	426.613	1.750	2166	R\$ 12.173.909	4.293.682	3,83	446	1%	3%	3%	12%	5%	2%	54%	0%	22%	23%	56%	22%	22%	23%	56%	22%	22%	23%	56%	22%	22%	23%	56%	22%	22%	23%	56%	22%
ICGAMARJÓK				17200.000	R\$ 17.200.019	166	3114	891.724	1.406	159	422.237	1.716	2154	R\$ 12.303.336	4.407.827	3,67	426	1%	3%	3%	12%	7%	2%	54%	0%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%
ICGAMARJÓK				17100.000	R\$ 17.100.019	165	3072	894.327	1.408	155	418.818	1.719	2145	R\$ 12.188.906	4.300.451	3,59	422	1%	1%	2%	15%	8%	2%	54%	0%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%
ICGAMARJÓK				85/sem	R\$ 17.676.820	170	3077	869.002	1.280	158	431.546	1.707	2197	R\$ 12.569.403	4.901.392	3,64	401	1%	8%	12%	6%	4%	1%	54%	0%	14%	31%	55%	14%	14%	31%	55%	14%	14%	31%	55%	14%	14%	31%	55%	14%	14%	31%	55%	14%
ICGAMARJÓK	MIN.	VAZ ÓLEO	CLT	17500.000	R\$ 17.500.018	168	3077	816.859	1.302	157	424.002	1.666	2167	R\$ 12.314.538	4.024.821	3,64	399	1%	3%	3%	16%	7%	1%	55%	0%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%				
ICGAMARJÓK				17300.000	R\$ 17.300.019	167	3024	842.658	1.315	152	418.652	1.674	2146	R\$ 12.240.883	4.384.298	3,54	399	0%	2%	4%	17%	8%	1%	55%	0%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%
ICGAMARJÓK				17200.000	R\$ 17.200.019	166	2989	849.703	1.328	148	415.934	1.681	2136	R\$ 12.220.368	4.274.809	3,48	399	0%	1%	4%	18%	8%	1%	55%	0%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%
ICGAMARJÓK				17100.000	R\$ 17.100.019	165	3063	888.276	1.400	154	418.757	1.712	2145	R\$ 12.199.772	4.242.299	3,58	422	0%	0%	3%	15%	8%	2%	54%	0%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%	18%	26%	56%	18%
ICGAMARJÓK				85/sem	R\$ 17.676.820	170	3077	869.002	1.280	158	431.546	1.707	2197	R\$ 12.569.403	4.901.392	3,64	401	1%	8%	12%	6%	4%	1%	54%	0%	14%	31%	55%	14%	14%	31%	55%	14%	14%	31%	55%	14%	14%	31%	55%	14%	14%	31%	55%	14%
ICGAMARJÓK	MIN.	DETRITOS PNEUS	CLT	17500.000	R\$ 17.500.017	168	3030	861.511	1.284	153	425.806	1.698	2174	R\$ 12.469.681	4.867.794	3,55	401	1%	4%	11%	10%	4%	1%	54%	0%	14%	31%	55%	14%	14%	31%	55%	14%	14%	31%	55%	14%	14%	31%	55%	14%				
ICGAMARJÓK				17300.000	R\$ 17.300.019	167	3028	856.474	1.300	150	419.903	1.678	2155	R\$ 12.303.358	4.612.027	3,51	399	1%	2%	3%	17%	8%	2%	54%	0%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%
ICGAMARJÓK				17200.000	R\$ 17.200.019	166	3017	859.825	1.324	149	416.346	1.682	2139	R\$ 12.223.892	4.269.855	3,49	399	1%	1%	3%	18%	8%	2%	54%	0%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%	14%	30%	56%	14%
ICGAMARJÓK				17100.000	R\$ 17.100.019	165																																							

APÊNDICE H – Resultado da otimização multiobjetivo – Análise de Trade off

Tabela 0-9 – Resultados dos parâmetros de a variação do ϵ -restrito

Cons. de Comb.	LT (R\$/sem) = RT - CLT		PARÂMETROS AMBIENTAIS NEGATIVOS						PARÂMETROS SOCIAIS POSITIVOS		PARÂMETROS SOCIAIS NEGATIVOS		
	LT TOTAL (R\$)	Lmédio R\$/ton	Emissões TOTAIS CO2/sem	Consumo Comb. (kl/sem)	Detritos de pneu (kg)	Pneus cons. (#/sem.)	Emissões s PA (Kg/sem)	Vazam.de óleo Diesel (l/sem)	Vagas Criadas	PIB	Impactos sonoros (M Dbs)	Vit. Fatais por ano	Perdas (t/sem)
$\xi \leq$	R\$ 1.873.827	25,9	1.623	715	868	200	237	914	1.180	6.872.759	4.509	2,33	375
710	R\$ 1.873.827	25,9	1.613	710	860	196	236	910	1.178	6.874.471	4.492	2,31	374
705	R\$ 1.873.115	25,9	1.606	705	852	193	236	905	1.175	6.863.827	4.495	2,30	374
700	R\$ 1.868.130	25,8	1.598	700	844	191	236	900	1.176	6.884.428	4.497	2,29	372
695	R\$ 1.861.907	25,7	1.591	695	837	188	236	899	1.176	6.896.761	4.512	2,28	368
690	R\$ 1.855.684	25,6	1.584	690	830	186	235	897	1.177	6.909.094	4.527	2,27	364
685	R\$ 1.849.461	25,6	1.578	685	823	184	235	896	1.177	6.921.428	4.542	2,26	360
680	R\$ 1.843.238	25,5	1.571	680	816	181	235	894	1.177	6.933.761	4.557	2,25	356
675	R\$ 1.837.015	25,4	1.564	675	809	179	235	892	1.177	6.946.095	4.573	2,23	352
670	R\$ 1.830.792	25,3	1.557	670	802	177	235	891	1.177	6.958.428	4.588	2,22	348
665	R\$ 1.824.569	25,2	1.550	665	795	174	235	889	1.177	6.970.762	4.603	2,21	344
660	R\$ 1.818.346	25,1	1.543	660	788	172	234	887	1.177	6.983.095	4.618	2,20	339
655	R\$ 1.811.117	25,0	1.533	655	782	170	234	886	1.177	6.992.601	4.630	2,19	336
650	R\$ 1.799.268	24,9	1.512	650	782	170	234	883	1.175	6.985.929	4.633	2,19	336
645	R\$ 1.786.821	24,7	1.505	645	784	171	234	879	1.175	6.976.579	4.566	2,19	336
640	R\$ 1.767.774	24,4	1.496	640	773	172	235	874	1.180	7.029.521	4.554	2,18	336
635	R\$ 1.745.472	24,1	1.495	635	771	173	235	871	1.183	7.056.182	4.522	2,18	336
630	R\$ 1.711.137	23,6	1.512	630	765	176	236	866	1.186	7.051.101	4.495	2,20	336
625	R\$ 1.674.336	23,1	1.532	625	755	180	237	861	1.189	7.046.221	4.477	2,23	336
621	R\$ 1.623.573	22,4	1.547	621	754	182	239	862	1.195	489.263	4.469	2,26	336

Tabela 0-10 – Diferenças de ϵ com ponto inicial - metodologia multiobjetivo do ϵ -restrito

Cons. de Comb.	LT (R\$/sem) = RT - CLT		PARÂMETROS AMBIENTAIS NEGATIVOS						PARÂMETROS SOCIAIS POSITIVOS		PARÂMETROS SOCIAIS NEGATIVOS		
	LT TOTAL (R\$)	Lmédio R\$/ton	Emissões TOTAIS CO2/sem	Consumo Comb. (kl/sem)	Detritos de pneu (kg)	Pneus cons. (#/sem.)	Emissões s PA (Kg/sem)	Vazam.de óleo Diesel (l/sem)	Vagas Criadas	PIB	Impactos sonoros (M Dbs)	Vit. Fatais por ano	Perdas (t/sem)
$\xi \leq$	R\$ -	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0	
710	R\$ -	0,0	-10	-5	-8	-4	-1	-4	-2	1.712	-18	-0,0	-2
705	-R\$ 712	-0,0	-17	-10	-16	-7	-1	-10	-4	-8.932	-14	-0,0	-2
700	-R\$ 5.697	-0,1	-25	-15	-24	-9	-1	-14	-3	11.669	-12	-0,0	-3
695	-R\$ 11.920	-0,2	-32	-20	-31	-11	-1	-16	-3	24.002	3	-0,0	-7
690	-R\$ 18.143	-0,3	-38	-25	-38	-14	-1	-17	-3	36.335	18	-0,1	-12
685	-R\$ 24.366	-0,3	-45	-30	-45	-16	-2	-19	-3	48.669	33	-0,1	-16
680	-R\$ 30.589	-0,4	-52	-35	-52	-18	-2	-20	-3	61.002	48	-0,1	-20
675	-R\$ 36.812	-0,5	-59	-40	-59	-21	-2	-22	-3	73.336	63	-0,1	-24
670	-R\$ 43.035	-0,6	-66	-45	-66	-23	-2	-24	-3	85.669	78	-0,1	-28
665	-R\$ 49.258	-0,7	-73	-50	-73	-26	-2	-25	-3	98.002	94	-0,1	-32
660	-R\$ 55.481	-0,8	-80	-55	-80	-28	-2	-27	-3	110.336	109	-0,1	-36
655	-R\$ 62.710	-0,9	-90	-60	-86	-29	-3	-29	-3	119.841	121	-0,1	-39
650	-R\$ 74.559	-1,0	-111	-65	-86	-30	-3	-31	-5	113.170	124	-0,1	-39
645	-R\$ 87.006	-1,2	-118	-70	-84	-29	-3	-35	-5	103.820	57	-0,1	-40
640	-R\$ 106.053	-1,5	-127	-75	-95	-28	-2	-40	0	156.762	45	-0,2	-40
635	-R\$ 128.354	-1,8	-128	-80	-97	-27	-2	-44	4	183.423	13	-0,2	-40
630	-R\$ 162.689	-2,2	-111	-85	-103	-24	-1	-48	7	178.342	-14	-0,1	-40
625	-R\$ 199.491	-2,8	-91	-90	-113	-20	0	-54	10	173.462	-32	-0,1	-40
621	-R\$ 250.254	-3,5	-76	-94	-113	-18	2	-52	15	113.170	-40	-0,1	-40